

# Análisis de técnicas de monitorización en redes ópticas pasivas (PON) y desarrollos en la monitorización con radiofrecuencia en redes WDM-PON



**Trabajo de Fin de Grado**

**Grado de Ingeniería en Sistemas de Comunicaciones**

Alumno: Diego Tello Marcos

Tutora: M<sup>a</sup> Carmen Vázquez García



## **Contenido**

Lista de figuras.....	5
Lista de acrónimos, abreviaturas y siglas.....	8
Lista de tablas .....	10
Explicación de características en tablas 2 y 3.....	10
Capítulo 1. Introducción en inglés .....	12
1.1. Objectives .....	12
Capítulo 2. Redes Ópticas Pasivas de Acceso .....	14
2.1. Redes PON .....	14
2.2. Redes WDM-PON .....	14
2.3. Redes híbridas TDM-WDM-PON.....	15
Capítulo 3. Recomendaciones y medidas para la monitorización de fallos en redes ópticas ITU-T G.989.2 .....	17
Capítulo 4. Monitorización Óptica de Prestaciones, OPM.....	18
4.1. Medida del tono RF .....	18
4.2. Medida del pulso de reloj .....	18
4.3. Medida de la fase .....	18
4.4. Medida del grado de polarización .....	18
4.5. Medida de la relación señal a ruido óptica .....	19
4.6. Redes neuronales artificiales .....	19
4.7. Técnicas de monitorización electrónicas .....	19
4.7.1. Técnica de monitorización Q/Bit Error Rate .....	19
4.7.2. Diagramas de ojo .....	19
4.7.3. Histograma asíncrono .....	20
Capítulo 5. Técnicas de Detección Manual de fallos en Fibras y Elementos de la Red .....	21
5.1. Trazador visual de continuidad.....	21
5.2. Localización visual de fallos.....	21
5.3. Inspección visual de conector por microscopio.....	21
5.4. Medidores de potencia óptica .....	21
5.5. Cables de referencia .....	22



Capítulo 6. Técnicas de Monitorización para la Detección Automática de fallos en redes TDM-PON .....	23
6.1. Reflectometría óptica en el dominio del tiempo simple .....	23
6.2. Técnica basada en Brillouin OTDR (BOTDR) .....	23
6.3. Técnica basada en OTDR integrado .....	24
6.4. Técnica Active Bypass.....	25
6.5. Técnica Semi-Passive Bypass .....	26
6.6. Técnica basada en reflector de referencia.....	26
6.7. Técnica basada en SRE .....	27
6.8. Técnica basada en SL-RSOA .....	28
6.9. Técnica basada en señales moduladas reflectivas.....	28
6.10. Sistema de monitorización de roturas en fibras FBMS .....	29
6.11. Detección de fallos por realimentación óptica en láseres caóticos .....	30
6.12. Técnica de monitorización de fallos con soporte para servicios móviles.....	30
Capítulo 7. Técnicas de Monitorización para la Detección Automática de fallos en redes WDM-PON .....	32
7.1. Técnica basada en elementos reflectivos .....	32
7.2. Técnica basada en OTDR sintonizable .....	33
7.3. Solución basada en multiplexor DWDM.....	33
7.4. Solución basada en módulo de adaptación longitud de onda .....	34
7.5. Solución que utiliza transmisores LED de subida.....	35
7.6. Solución que utiliza transmisores VCSEL de subida.....	35
7.7. Técnica de auto-referencia por radiofrecuencia .....	35
7.8. Técnica basada en la multiplexación óptica por división de código .....	38
7.9. OFDR Optical Frequency Domain Reflectometer .....	38
7.10. Sistema de monitorización óptica preventiva con reflectores comunes .....	38
Capítulo 8. Aplicaciones comerciales.....	40
8.1. WDM-DOCTOR: HR-OSA .....	40
8.2. WDM-DOCTOR.....	41
8.3. FIBERTEST de Agizer: Remote Fiber Testing System .....	42
Capítulo 9. Tablas Comparativas.....	44
9.1. Técnicas de Monitorización para la Detección Automática de fallos .....	44
9.2. Aplicaciones Comerciales .....	45



Capítulo 10. Diseño de controlador para <i>switch</i> óptico .....	47
10.1. Descripción .....	47
10.2. Funcionamiento y esquemáticos.....	48
10.3. Pruebas .....	49
10.3.1. Soldadura y pruebas de la placa .....	49
10.3.2. Pruebas ópticas .....	51
Capítulo 11. Caso de Estudio: Simulación de la técnica óptica preventiva con reflectores comunes .....	60
11.1. Herramientas de la simulación .....	60
11.2. Localizaciones posibles para la aplicación del <i>switch</i> óptico en una red WDM- PON.....	60
11.3. Escenarios en la simulación de la técnica de monitorización .....	61
11.3.1. Escenario red clásica WDM-PON .....	61
11.3.2. Escenario red WDM-PON con sistema de monitorización.....	62
Características de los dispositivos utilizados .....	64
11.4. Medidas del balance de potencias .....	67
11.5. Medidas de la BER .....	69
11.5. Conclusiones del caso de estudio.....	71
Capítulo 12. Conclusiones en inglés .....	72
Capítulo 13. Retos y direcciones futuras .....	73
Bibliografía.....	74
Anexo I. Pliego de Condiciones.....	76
Anexo II. Capturas del desarrollo en Labview.....	79
Anexo III. Hojas de características .....	81
Anexo IV. Información utilizada del estándar G.698.3 de la ITU .....	103
Anexo V. Esquemáticos y parámetros principales de configuración de los dispositivos utilizados en la simulación en VPI .....	104
Annex VI: Resumen en inglés.....	107



## Lista de figuras

Figura 1: Arquitectura básica de una red PON.

Figura 2: Diagrama de una red PON híbrida WDM-TDM

Figura 3: Arquitectura de la técnica basada en OTDR Brillouin

Figura 4: Diagrama del modelo utilizado en la técnica de OTDR sintonizable

Figura 5: Arquitectura de la técnica basada en *Active Bypass*

Figura 6: Arquitectura de la técnica basada en *Semi-Passive Bypass*

Figura 7: Arquitectura de la técnica basada en reflector de referencia

Figura 8: Arquitectura de la técnica basada en SRE

Figura 9: Arquitectura de la técnica basada en SL-RSOA

Figura 10: Arquitectura de la técnica basada en señales moduladas reflectivas

Figura 11: Diagrama de bloques de FBMS

Figura 12: Arquitectura de la técnica de detección de fallos por realimentación óptica en láseres caóticos

Figura 13: Arquitectura de la técnica con soporte para servicios móviles

Figura 14: Arquitectura de la técnica basada en elementos reflectivos

Figura 15: Arquitectura de la técnica con OTDR sintonizable

Figura 16: Arquitectura de la técnica basada em demultiplexor DWDM

Figura 17: Curvas teóricas del parámetro R contra el coeficiente de atenuación óptico en las fibras adiferentes desplazamientos de fase

Figura 18: Arquitectura de la técnica de auto-referencia por radiofrecuencia

Figura 19: Arquitectura de una red WDM-PON a la que se aplica la técnica de monitorización óptica preventivo con reflectores comunes

Figura 20: Diagrama de bloques del Analizador

Figura 21: Diagrama de bloques del T-OTDR

Figura 22: Parámetros característicos de FIBERTEST

Figura 23: Esquema principal del sistema para controlar el *switch* óptico

Figura 24: Esquemático del controlador del *switch* óptico

Figura 25: Ventana de configuración del AnalogOut en Labview

Figura 26: Lógica de control del *switch* óptico modo ON

Figura 27: Lógica de control del *switch* óptico modo OFF



Figura 28: *Front Panel* del desarrollo en Labview

Figura 29: Símbolo y distribución de los puertos del *switch* óptico

Figura 30: Esquema de la utilización del circulador óptico para medir la potencia en el puerto de entrada del *switch* óptico

Figura 31: Esquema de medición de potencia óptica para la caracterización del *switch* óptico

Figura 32: Valores utilizados de las pérdidas de inserción del circulador óptico

Figura 33: Esquema de sistema para medir el tiempo de respuesta del *switch* óptico

Figura 34: Señales del *Analog Out* del DAQ y de la salida del *switch* óptico en el momento de la conmutación

Figura 35: Colocación del cursor en la señal del *Analog Out* del DAQ en el canal 1 para el cálculo del tiempo de respuesta del *switch* óptico

Figura 36: Colocación del cursor en la señal de salida del fotodetector correspondiente al *switch* óptico en el canal 2 para el cálculo del tiempo de respuesta del *switch* óptico

Figura 37: Arquitectura del escenario WDM-PON clásica

Figura 38: Bandas de trabajo de la técnica de monitorización óptica preventiva con reflectores comunes

Figura 39: Arquitectura del escenario WDM-PON con el sistema de monitorización

Figura 40: Espectro de transmisión de potencia de los canales 19 y 20 en la banda L de los AWGs utilizados en el montaje del escenario del caso de estudio

Figura 41: Espectro de potencia del FBG centrado en 1490 nm situado en la fibra de alimentación

Figura 42: Espectro de potencia de los FBGs centrados en 1470 nm que se sitúan en las fibras de distribución

Figura 43: Espectro de transmisión de potencia de los canales 19 y 20 de los AWGs en la banda S

Figura 44: Pérdidas de inserción en el canal 19 para los dos escenarios con diferentes atenuaciones del VOA



Figura 45: Pérdidas de inserción en el canal 20 para los dos escenarios con diferentes atenuaciones del VOA

Figura 46: Valores de la BER medidos en los canales 19 y 20 en función de la atenuación de los VOAs en la red WDM-PON sin el sistema de monitorización

Figura 47: Valores de la BER medidos en los canales 19 y 20 en función de la atenuación de los VOAs en la red WDM-PON con el sistema de monitorización



## **Listado de acrónimos, abreviaturas y siglas**

ACF	Auto-Correlation Function
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ANN	Artificial Neural Networks
APC	Angulate Polished Connector
APD	Avalanche Photodiode
AWG	Array Waveguide Grating
BER	Bit Error Rate
BFS	Brillouin Frequency Shift
BLS	Broadband Light Source
BNC	Bayonet Neill-Concelman
BOTDR	Brillouin Optical Time Domain Reflectometer
CD	Chromatic Dispersion
CLK	Clock
CM	Coding Mirror
CO	Central Office
CPE	Customer Premises Equipment
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DAQ	Data Acquisition
DBR	Distributed Bragg Reflector
DOP	Degree of Polarization
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EWAM	External Wavelength Adaptation Module
FBG	Fiber Bragg Grating
FBMS	Fiber-Break Monitoring System
FMS	Fiber Monitoring System
FPM	Fiber Plant Manager
FTTH	Fiber To The Home
GND	Ground
GPON	Gigabit-Capable Passive Optical Network
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LD	Laser Diode
MEMS	Micro-Electromechanical System
MP	Monitoring Point
NG-PON	Next Generation Passive Optical
NI-DAQ	National Instrument Data Acquisition
ODN	Optical Distribution Networks
OCDMA	Optical Code Division Multiple Access
OF	Optical Filter
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometer
OLT	Optical Line Termination
OMM	Optical Monitoring Module
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit





OPM	Optical Performance Monitor
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OSNR	Optical Signal To Noise Ratio
OSW	Optical <i>Switch</i>
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
OTM	Optical Transceiver Monitoring
PBRs	Pseudorandom Binary Sequence
O+M	Operations and Maintenance
PMD	Polarization Mode Dispersion
PON	Passive Optical Network
PSC	Power Splitter Combiner
QoS	Quality of Service
RDR	Reflective Dynamic Range
RF	Radiofrecuencia
RGT	Red de Gestión de las Telecomunicaciones
RN	Remote Node
RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier
RZ	Return to Zero
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SL-RSOA	Self-Injection Locked Reflective Semiconductor Optical Amplifier
SOA	Semiconductor optical amplifier
SRE	<i>Switchable</i> Reflective Element
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiplex Access
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
VFL	Visual Fault Locator
VOA	Variable Optical Attenuators
VPI	Virtual Photonics Instrument
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WM	Wavelength Multiplexer
WSC	Wavelength Selective Coupler



## Lista de tablas

Tabla 1: Parámetros y medidas necesarias para el despliegue de una PON

Tabla 2: Comparación entre técnicas de monitorización automática

Tabla 3: Comparación entre productos comerciales.

Tabla 4: Medidas en la placa controladora del *switch* óptico

Tabla 5: Valores de comprobación de encaminamiento de la luz en el *switch* óptico  
a 1310 nm

Tabla 6: Valores de la caracterización del circulador óptico medidos con longitud  
de onda 1472 nm

Tabla 7: Valores de la caracterización del circulador óptico medidos con longitud  
de onda 1547.71 nm

Tabla 8: Valores de la caracterización del circulador óptico medidos con longitud  
de onda 1577 nm

Tabla 9: Valores de la caracterización del *switch* óptico medidos con longitud de  
onda 1472 nm

Tabla 10: Valores de la caracterización del *switch* óptico medidos con longitud de  
onda 1547,1 nm

Tabla 11: Valores de la caracterización del *switch* óptico medidos con longitud de  
onda 1577 nm

Tabla 12: Resultados de las medidas del tiempo de respuesta del *switch* óptico

Tabla 13: Parámetros generales de los emisores *Laser Pulsed*

Tabla 14: Parámetros generales de los fotodiodos APD

Tabla 15: Valores de las medidas de potencia sobre el escenario WDM-PON sin  
el sistema de monitorización de auto-referencia

Tabla 16: Valores de las medidas de potencia sobre el escenario WDM-PON con  
el sistema de monitorización de auto-referencia

## Explicación de características en tablas 2 y 3

*Transparencia*: capacidad de operar en las bandas C y L (envío simultáneo de señal de  
datos y monitorización).

*Demarcación*: capacidad de diferenciar si el fallo se encuentra en la parte de la red con  
responsabilidad del operador o del cliente.

*Cliente independiente*: capacidad de diferenciar en que red de cliente se encuentra el error.



## Análisis de técnicas de monitorización en redes ópticas pasivas (PON) y desarrollos en la monitorización con radiofrecuencia en redes WDM-PON

*PSC en cascada*: capacidad de detectar los errores en una red que tiene varios *splitters* por rama.

*PON desplegada*: facilidad de adaptación a redes PON ya desplegadas.



## Chapter 1. Introduction

This document builds on the work entitled "Analysis of monitoring techniques in passive optical network (PON) and monitoring developments in radiofrequency in WDM-PON networks" done in the Group of Displays and Photonic Applications of Electronic Technology Department of the University Carlos III of Madrid. The work has been supervised by the Dr. Carmen Vazquez and assisted by members of the department. The different instruments used in the project and performed developments are within the frame of competitive project TEC2015-63826-C3-2-R (MINECO/FEDER).

The contents of the document are mainly, an analysis of the monitoring techniques of passive optical networks that currently exist, in both TDM-PON as WDM-PON networks. In addition, we explain manual detection techniques of failures in fibers and the OPM.

Subsequently, this work develops the manufacture of a controller board of an optical switch, whose design had already been done at the Group of Displays and Photonic Applications of the Universidad Carlos III. To do this, we analyze the electrical and optical operation of the optical switch, and carry out a development in Labview. This controller board will be used to complete the study case in the preventive optical monitoring system with colourless reflectors, developed by the Group of Displays and Applications of Electronic Technology Department of the University Carlos III of Madrid.

For this study case, we will do a simulation in VPI, where the system is implemented in a WDM-PON network, and we will do optical power and BER measurements to demonstrate that the use of the monitoring technique produces a negligible effect in the quality of the data transmission on the WDM-PON network. To do this, it is also designed a WDM-PON network without engaging the monitoring technique to compare their performance with the simulation previously performed.

### 1.1. Objectives

Customers and suppliers are increasingly demanding more speed and quality of services. Trends such as Internet of things, the convergence of services and the constant improvement of the quality of services are causing the use of optical networks to replace copper cable networks due to its several advantages. The optical networks are used both in environments of long reach and short range. In the case of Passive Optical Networks (PON), they can be based on time multiplexing (TDM-PON) or wavelength multiplexing (WDM-PON). These networks are applied to architectures as FTTH among others. This architecture allows deploying the fiber to the client home delivering high-speed services.

Some of the challenges that come with the growth of these networks, the requirement for greater capacity and their complexity, are the detection and location of faults due to its technical difficulty and high costs to the suppliers. The biggest problem of the current faults detection systems in PON networks is the need to perform manual jobs by the suppliers to detect failures and the costs that this entails. Therefore, it is very important to automate the monitoring systems of these networks for the faults detection. Something that will focus this document.



The first step will be to introduce the most used types of passive optical networks and subsequently, we explain some techniques of failure detection. In addition, it is also cited some techniques of optical performance monitoring (OPM) that can be used as auxiliary elements to control certain parameters.

Due to the high demands of the WDM-PON networks, it is interesting to present cases of study such as the preventive optical monitoring system with colourless reflectors that is developed in this work. Their advantages and disadvantages are described below.



## Capítulo 2. Redes Ópticas Pasivas de Acceso

### 2.1. Redes PON

PON es un tipo de red que se caracteriza por tener una gran variedad de aplicaciones para proveer servicios de banda ancha a los usuarios mediante redes de acceso de fibra óptica.

Este tipo de red nos permite evitar la necesidad de utilizar componentes activos que puedan existir entre el servidor y el cliente, añadiendo en dicho lugar, componentes ópticos pasivos tales como los divisores ópticos pasivos o “*splitters*”. Estos divisores nos servirán para manipular el tráfico por la red. Esta red pasiva ayuda a reducir los costes siendo bastante utilizada en las redes FTTH [1].

Como en las redes de cable, existen dos canales:

- En canal descendente, una red PON es una red punto-multipunto donde la OLT envía una serie de contenidos que recibe el divisor y que se encarga de repartir a todas las unidades ONU, cuyo objetivo es el de filtrar y enviar al usuario sólo aquellos contenidos que vayan dirigidos a él. En este procedimiento se utiliza la multiplexación en el tiempo TDM para enviar la información en diferentes instantes de tiempo.
- En canal ascendente una PON es una red punto a punto donde las diferentes ONUs transmiten contenidos a la OLT. Por este motivo también es necesario el uso de TDMA para que cada ONU envíe la información en diferentes instantes de tiempo, controlados por la unidad OLT. Al mismo tiempo, todos los usuarios se sincronizan a través de un proceso conocido como “*Ranging*”.

Son varias las ventajas de las redes ópticas pasivas frente a otros accesos fijos de banda ancha como las redes de cable o ADSL:

- El ancho de banda ofrecido a los usuarios es mayor. Este ancho es diferente en cada estándar concreto. En el estándar GPON se supera 1 Gbps.
- Aumento de la cobertura que llega a una distancia de unos veinte kilómetros desde la central.
- Minimización de la cantidad de fibra óptica necesaria para el despliegue si se compara con las arquitecturas punto a punto.
- Mejora en la calidad del servicio gracias a la inmunidad electromagnética que presenta la fibra óptica a los ruidos externos.

### 2.2. Redes WDM-PON

WDM-PON conserva a nivel físico la misma arquitectura punto a multipunto de TDM-PON, si bien cada ONU tiene una longitud de onda dedicada. Podemos verlo de tal manera que cada longitud de onda es un canal punto a punto, que podrá transportar velocidades dedicadas y simétricas a cada usuario, que van desde los 100 Mbps hasta los 10 Gbits/s. Para la transmisión sobre una única fibra sin interferencias se utilizan bandas de longitudes de onda distintas en sentido ascendente y descendente. En WDM-PON, las longitudes de onda ascendente y descendente pueden ser únicas para el abonado o cliente empresarial FTTH sobre una ONT, pero también pueden ser compartidas por varios abonados.

La utilización de WDM-PON en la red de acceso ofrece grandes beneficios respecto a las técnicas TDM-PON [2]:

- Es mucho más sencillo ofrecer altos anchos de banda garantizados distintos, simétricos o asimétricos, dedicados y sin ningún tipo de contención, a cada abonado, puesto que no hay compartición en el tiempo de la longitud de onda.
- Alta escalabilidad en ancho de banda debido a la transparencia de la tasa binaria y a la facilidad en añadir o quitar canales.
- Mayores distancias y factores de división debido a las menores pérdidas ópticas.
- Gestión, operación y mantenimiento de la red más sencillo.
- Mayor seguridad debido a la separación del tráfico entre abonados.
- Mayor facilidad para crear redes ópticas abiertas, lo cual permite la compartición de la misma red de acceso física por varios operadores tal y como ocurre en las actuales redes ADSL sobre cobre.
- Menor latencia, lo cual es junto a permitir elevados anchos de banda, muy importante para las aplicaciones como los juegos online, servicios “*cloud computing*” y comunicaciones unificadas entre otros.

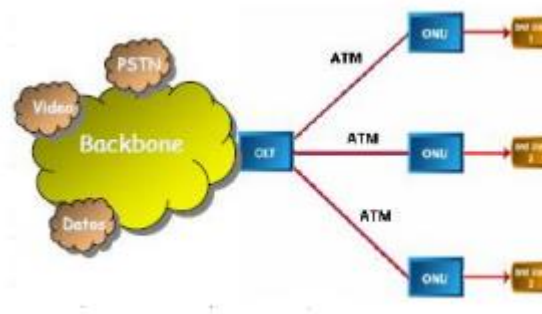


Figura 1: Arquitectura básica de una red PON.

Juan Sebastián Guevara Henao, “Tecnologías de Redes PON”, páginas 1-2, 2015.

### 2.3. Redes híbridas TDM-WDM-PON

La utilización de redes que combinan las tecnologías TDM-PON y WDM-PON está aumentando en los últimos años, principalmente porque combina las ventajas de ambas arquitecturas [3], [4]:

- Utilización de varias longitudes de onda tanto en el enlace ascendente como descendente para explotar el gran ancho de banda de la fibra o lo que es lo mismo, se pueden atender a un número mayor de usuarios con una sola fibra troncal.
- Consigue una alta velocidad (WDM\_PON) con un bajo coste unitario (TDM-PON).
- Mejora con respecto a TDM-PON, la capacidad de protección de la fibra y por tanto disminuye la pérdida de datos por fallos en la fibra. Esto conlleva una mayor fiabilidad en la fibra.
- Facilidad para adaptar redes TDM-PON a estas redes ópticas híbridas.

Estas redes se suelen diseñar a partir de una red TDM sin realizar modificaciones en los ONT, aplicando WDM en los OLT y permitiendo aumentar la capacidad de usuarios.

Además de aplicar WDM, es necesario utilizar láseres de longitudes de onda distintas compatibles con los receptores de los terminales ONT. Cada longitud de onda se corresponderá con un usuario. Estas longitudes de onda se multiplexan en el OLT como se observa en la figura 2 [5]. Este tipo de topología representa una transición entre las redes PON actuales y las redes WDM-PON.

Para el diseño e implementación de las redes híbridas, en un futuro se va a apostar por la utilización de elementos más inteligentes y de menor consumo de potencia. Por ejemplo, se utilizarán equipos que sean capaces de cumplir con las funciones de CPE y ONT en el domicilio del usuario, multiplexores que sean capaces de gestionar el tráfico de bajada y subida de varios OLT, o *splitters* que serán capaces de distribuir la luz en un mayor número de salidas. Con las redes híbridas de próxima generación se podrán atender a un número mayor de usuarios con un menor número de elementos en la red y multiplicando la velocidad hasta 10 Gbits/s. La única tecnología con la que se podrá implementar estas redes será FTTH y por tanto la tendencia será el aumento del número de instalaciones FTTH hasta constituir el 100% de redes de este tipo.

Con todo lo explicado anteriormente, seremos capaces de utilizar servicios de alta calidad como juegos online, videoconferencias, vídeos en alta definición y servicios en la nube a velocidades muy altas.

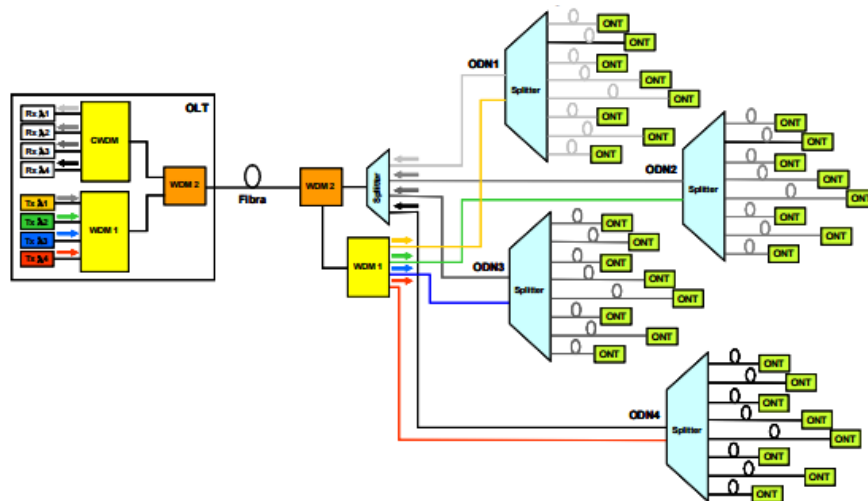


Figura 2: Diagrama de una red PON híbrida WDM-TDM

João Batista Rosolem, Rivaldo Strobel Penze, Edson Wilson Bezerra, Fernando Rocha Pereira, Bruno César de Camargo Angeli, Eduardo Mobilon, Júlio César Said, Antônio Donizete Coral, "Arquiteturas baseadas em WDM para as próximas redes PON", páginas 65-76, 2010.



### Capítulo 3. Recomendaciones y medidas para la monitorización de fallos en redes ópticas ITU-T G.989.2

A nivel de normativa es importante tener en cuenta algunas recomendaciones necesarias para la monitorización de errores en la capa física de las redes TDM-PON y WDM-PON [6]. En la tabla 1 se indican algunas medidas específicas que se tienen que cumplir en las técnicas de monitorización.

	Rango típico (Nota1)	Resolución	Precisión	Repetibilidad	Tiempo de respuesta
Temperatura – OLT and ONT	–45 a +90 C	0.25 C	±3 C	±1 C	1 s
Voltaje – OLT and ONT (Nota 4)	0 a 6.55 V	0.5% nominal	±3% nominal	±1% nominal	1 s
Corriente Bias – OLT and ONT (Nota 4)	0 a 819 mA	0.1 dB	±10% nominal	±5% nominal	1 s
Potencia de transmisión ONT	–28 a +20 dBm	0.1 dB	±3 dB	±0.5 dB (Nota 2)	300 ns
Potencia de recepción ONT	–53 a –4.9 dBm	0.1 dB	±3 dB (Nota 5)	±0.5 dB (Nota 2, 6)	300 ns
Potencia de transmisión OLT	–28 a +20 dBm	0.1 dB	±2 dB	±0.5 dB (Nota 2)	300 ns
Potencia de recepción OLT (Nota 3)	53 a –4.9 dBm	0.1 dB	±2 dB (Nota 5)	±0.5 dB (Nota 2, 6)	300 ns

Tabla 1: Parámetros y medidas necesarias para el despliegue de una PON

C: Centígrados V: Voltios dB: decibelios dBm: decibelios referidos a miliwatios

- Nota 1: el rango típico mide el conjunto de valores más habituales en un módulo óptico.
- Nota 2: la repetitividad óptica ONT y OLT se refiere a múltiples mediciones tomadas cuando los valores de la temperatura y el voltaje ONT o OLT son los mismos en el momento de la medición. Se utiliza para medir el envejecimiento de los módulos ópticos.
- Nota 3: la medición de la potencia óptica recibida en el OLT refleja la potencia media recibida durante una ráfaga de luz. Esto requiere la medición en el momento adecuado con respecto a la ráfaga entrante, y que la ráfaga sea lo suficientemente larga como para cumplir con el tiempo de respuesta del detector.
- Nota 4: Con el término nominal se refiere al valor de diseño de la cantidad que se mide (es decir, voltaje o corriente de polarización) para la implementación del dispositivo particular.
- Nota 5: la precisión absoluta en la potencia recibida es desde +3 dB a -35 dBm por abajo y desde +5 dB a -35 dBm por encima.
- Nota 6: la repetitividad por debajo de 0.5 dB en hasta -35 dBm de potencia óptica. El tiempo de medida va de 1 a 10 segundos.

Es necesario indicar que originalmente, la corriente de polarización de la fuente de luz emisora se utilizaba por sí sola para monitorizar las redes PON ya que no es habitual la utilización de componentes activos como láseres con modulación externa ni de amplificadores ópticos.

## Capítulo 4. Monitorización Óptica de Prestaciones, OPM

Las técnicas OPM se utilizan en redes de alta capacidad que normalmente utilizan WDM, con el objetivo de monitorizar diferentes parámetros en la capa física de las redes ópticas. Las técnicas automáticas de monitorización de errores en redes ópticas introducen a veces, pérdidas de potencia, distorsiones, ruido, errores... que son supervisadas por las técnicas OPM permitiendo disminuir los costes de operación y mantenimiento. Además las técnicas OPM son capaces de evaluar la calidad del canal de datos (QoS) midiendo sus características ópticas sin mirar directamente la secuencia de bits transmitidos. En este apartado se van a explicar algunos de los métodos [5], [7] que nos servirán como herramientas complementarias a las técnicas automáticas de monitorización centradas en detectar fallos en el enlace de fibra. Nos permitirán el control y mantenimiento del enlace que serán la parte central de este trabajo y se describirán en otros apartados de la memoria:

### 4.1. Medida del tono RF

Este método permite monitorizar el CD, PMD, OSNR y la potencia de canal. Dentro de esta técnica, se incluyen varios métodos diferentes:

- Un método que se basa en la detección de la conversión de una señal modulada en fase en una señal modulada en amplitud debido al efecto de la CD
- Un segundo método es la inserción de una subportadora (tono RF) en el transmisor. Se trata de medir el retardo de la señal subportadora que se ha introducido con la señal de banda base.
- Utilización de dos portadoras a distintas velocidades que sufren un desfase. Con ese desfase se puede medir la dispersión por polarización.

Estos dos métodos son compatibles con redes WDM pero hay modificar el transmisor.

### 4.2. Medida del pulso de reloj

Se trata de un método similar al anterior pero que se utiliza para las señales RZ. Se pueden monitorizar las mismas magnitudes que con la técnica anterior. En este caso no necesitamos modificar el transmisor para su uso en WDM.

Para su uso con un único canal, si es necesario realizar modificaciones para aislar los efectos de CD y PMD.

### 4.3. Medida de la fase

Se mide el desfase entre dos portadoras calculando el tiempo y la distancia a las que se producen los mayores desfases para averiguar dónde se encuentra el fallo en la red. Este método es capaz de monitorizar la CD.

No es necesaria la modificación del transmisor y se puede aplicar a señales WDM modificando el filtro óptico. Además se requiere un detector de fase de altas prestaciones.

### 4.4. Medida del grado de polarización

El grado de polarización (DOP) viene dado por el cociente entre la potencia de la parte polarizada de la luz y la potencia total. Midiendo el DOP podemos monitorizar el PMD que afecta a las características de transmisión de la señal óptica. Con esta técnica no es



necesario tener un circuito de alta velocidad y no le afectan otras distorsiones que no sean el PMD. No es compatible con WDM.

#### **4.5. Medida de la relación señal a ruido óptica**

Las técnicas de medición de OSNR son muy habituales, ya que ofrecen una información importante de la calidad del canal. Normalmente se miden mediante un filtro paso banda y un OSA [8]. Sin embargo en redes reconfigurables, se introducen canales WDM y se interconectan entre sí, dando lugar a ramas de red con diferentes amplificadores, filtros... Esto provoca que el ruido no sea uniforme entre los canales y que su cálculo por canal se deba monitorizar en cada banda.

Se puede calcular el OSNR mediante métodos tales como la utilización de un polarizador, muestreo asíncrono, por interferómetro, diagrama de ojo, detección del canal con ruido no polarizado, etc. Muchos de estos métodos son complejos y, necesitan componentes de alta velocidad y alta potencia.

#### **4.6. Redes neuronales artificiales**

Estas técnicas tienen el fin de crear redes robustas y auto-gestionadas. Para ello se propone el uso de receptores que diagnostican y redirigen las señales según los fallos de la red. Las redes neuronales artificiales [8] (ANNs) son fáciles de utilizar y tienen la capacidad de procesar relaciones no lineales proporcionando un tiempo de respuesta rápido y gran precisión. Las ANN se componen de varios niveles denominados neuronas que analizan los datos del estado de la red y comparten esa información entre ellas.

Estos sistemas son capaces de calcular el CD, PMD y OSNR, utilizando métodos como diagramas de ojo, diagramas asíncronos, constelaciones e histogramas. Además también se pueden utilizar para detectar errores no lineales en sistemas de alta velocidad.

#### **4.7. Técnicas de monitorización electrónicas**

Estos métodos se basan en la utilización de dispositivos electrónicos para medir y monitorizar distintos parámetros como CD, PMD, OSNR y BER [4]. A continuación se describen algunos de ellos.

##### **4.7.1. Técnica de monitorización Q/Bit Error Rate**

Esta técnica es posiblemente la más usada y eficiente. El problema para aplicar esta técnica, es que la señal que se comienza a transmitir en la red es una señal sin errores. Sin embargo, cuando la señal se está transmitiendo por la red óptica estas redes utilizan amplificadores y no regeneradores. Por tanto, el ruido se va acumulando. Cuando se llega al final de la red, el ruido ya se ha acumulado pero todavía no es suficiente para medirlo y por tanto hay que inyectar un ruido adicional de manera que ya se puede medir la BER.

Para obtener una gran precisión con este método, se utiliza una monitorización *Q-factor*. Consiste en bajar el umbral del voltaje del medidor para que éste se active con mayor facilidad.

##### **4.7.2. Diagramas de ojo**

Es una herramienta común para analizar la calidad de las señales que también se utiliza para monitorizar las redes ópticas. Esta herramienta realiza mediciones del PMD creando una distribución de amplitud sincrónica de un periodo de bit y las correlaciona con la BER.



#### **4.7.3. Histograma asíncrono**

Cuando en un método de diagrama de ojo la información de reloj está vacía hay que rellenarlo con valores aleatorios consiguiendo así un histograma asíncrono de un periodo de bit. Como no es necesaria la acción del reloj, este método se convierte en una técnica de *low cost*. A partir de este histograma asíncrono se puede estimar la BER. Con el histograma se pueden estimar y monitorizar el CD, PMD y el OSNR.

El tiempo de respuesta es bastante lento y el aislamiento de las distintas medidas todavía está bajo investigación.

## **Capítulo 5. Técnicas de Detección Manual de fallos en Fibras y Elementos de la Red**

Las técnicas de detección de fallos manuales requieren la acción del ser humano en el lugar en el que se desea realizar la medición [9]. Esto provoca un aumento sensible en los costes de operación y mantenimiento para los proveedores de servicio ya que es necesaria la acción de un técnico en el lugar donde está desplegada la red. A continuación se describen algunas de estas técnicas.

### **5.1. Trazador visual de continuidad**

Un trazador visual de continuidad permite trazar la trayectoria de una fibra desde un extremo a otro a través de varias conexiones, y así verificar la continuidad, si las conexiones son correctas y la polaridad de conector dúplex. El trazador visual de continuidad se parece a una linterna o a un instrumento similar a un bolígrafo con una bombilla o fuente LED que se acopla a un conector de fibra óptica. Hay que conectar la fibra bajo prueba al trazador y mirar por el otro extremo de la fibra para ver la luz transmitida a través del núcleo de la fibra. Si no se ve ninguna luz en el extremo, hay que volver a las conexiones intermedias para encontrar la sección del cable que está dañada.

### **5.2. Localización visual de fallos**

Una versión con más potencia del trazador visual de continuidad es un localizador visual de fallos (VFL), que utiliza un láser visible. La luz láser roja es lo suficientemente intensa para realizar una verificación de continuidad o para trazar fibras de varios kilómetros, identificar empalmes en bandejas de empalmes y mostrar roturas en fibras o conectores con pérdidas altas. Se puede ver la pérdida de luz en la rotura de una fibra a través de la luz roja brillante del VFL, o a través del revestimiento de varios cables simplex amarillos o naranjas. Su uso más importante consiste en encontrar fallos en cables cortos o cerca del conector donde los OTDR no pueden encontrarlos.

### **5.3. Inspección visual de conector por microscopio**

Los microscopios para inspección de fibra óptica se utilizan para inspeccionar conectores, a fin de corroborar que el pulido sea adecuado y encontrar fallos como rasguños, defectos de pulido y suciedad. Se pueden utilizar tanto para verificar la calidad del procedimiento de acabado como para diagnosticar problemas. Un conector bien hecho tiene un acabado suave, pulido y sin rasguños, y la fibra no muestra ningún signo de rajaduras, astillas o áreas donde la fibra esté sobresaliendo del extremo de la férula o hacia adentro.

### **5.4. Medidores de potencia óptica**

La medición de la potencia requiere un medidor de potencia con un adaptador que se ajuste al conector de fibra óptica en el cable que se está probando. Si se prueba un transmisor, se requiere un cable de fibra óptica que tenga un tamaño y apertura numérica adecuada, ya que la potencia acoplada depende de ambos parámetros y se necesita una conexión adecuada a la red para encender el transmisor. Cuando se obtiene el valor de la potencia se verifica si es compatible con la sensibilidad requerida por el sistema.



### **5.5. Cables de referencia**

La comprobación de pérdida requiere uno o más cables de referencia, según la comprobación realizada, y los adaptadores de acoplamiento adecuados y de alta calidad para los conectores. Los cables de referencia en general tienen una longitud de 1-2 metros, y tienen fibras y conectores que se ajustan a los cables que se quieren probar. La precisión de la medición dependerá de la calidad de los cables de referencia, dado que se unirán al cable bajo prueba. La calidad y la limpieza de los conectores en los cables de lanzamiento y recepción son unos de los factores más importantes en la precisión de las mediciones de pérdida. Siempre se prueban los cables de referencia de prueba mediante el cable de conexión *patchcord* o el método de un solo extremo.

## Capítulo 6. Técnicas de Monitorización para la Detección Automática de fallos en redes TDM-PON

La detección de fallos y roturas mediante las técnicas de monitorización de fallos manuales explicados antes suelen tener un alto coste y son muy ineficientes ya que se necesita la presencia de un técnico del proveedor de servicios o gestor de la red en el lugar donde está instalada la fibra. Es por ello que necesitamos automatizar la detección de estos fallos o errores. En este apartado se describen algunas de estas técnicas que se aplican en redes TDM-PON. La mayor parte de ellas se basan en reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR) con diferentes variantes [10] para poder identificar en qué rama se produce el fallo.

### 6.1. Reflectometría óptica en el dominio del tiempo simple

Un OTDR es un reflectómetro óptico en el dominio tiempo. Es un instrumento de medición que envía pulsos de luz, a la longitud de onda deseada, para luego medir sus “ecos”, o el tiempo que tarda en recibir una reflexión producida a lo largo de la fibra óptica. Entre otros, se aprovechan dos fenómenos físicos presentes en la transmisión por fibra óptica: esparcimiento ó *scattering* Rayleigh y reflexión Fresnel en la interfaz entre diferentes medios. Las muestras tomadas tras ser promediadas, se grafican en una pantalla donde se muestra el nivel de señal en función de la distancia. Así se pueden medir las atenuaciones ópticas en los diferentes tramos, las pérdidas de empalmes y conectores, las pérdidas entre dos puntos, etc.

La utilización del OTDR sólo se puede considerar una técnica de monitorización automática si se utiliza uno en cada rama, de tal manera que se pueda discernir en qué rama se producen los errores y con control remoto. Esto tiene el inconveniente de incrementar exponencialmente los costes. El OTDR aprovecha los fenómenos presentes en la fibra óptica para analizar y entregar un resumen detallado de la situación [7].

Se considera de utilidad el describir diferentes parámetros presentes en la medición con OTDR:

- Zona Muerta: se produce cuando dos reflexiones están muy cercanas y el OTDR las confunde siendo difícil la precisión al calcular la posición exacta de las mismas.
- RDR: cociente entre la potencia reflejada por un evento cercano al OTDR y la potencia de ruido de manera que si el OTDR es sensible el valor del RDR será elevado para corregir este exceso de sensibilidad.
- Resolución: distancia entre dos muestras que recoge el OTDR. Cuanto menor distancia, el OTDR ofrecerá una mayor resolución y también consumirá más recursos.

### 6.2. Técnica basada en Brillouin OTDR (BOTDR)

Esta técnica utiliza el desplazamiento de la frecuencia de *Brillouin* (BFS) para distinguir la señal retrodispersada que se devuelve de cada rama. A cada rama se le asigna una BFS específica durante el proceso de fabricación controlando la concentración de dopante en la fibra.

Cuando se transmite la señal óptica de prueba, se genera la potencia pico de cada BFS que se puede distinguir en cada rama. Si la potencia pico generada por el BFS cambia con respecto al valor de referencia, significa que en esa rama existe un fallo. La localización exacta del error se puede realizar mediante la señal del BOTDR de cada BFS en una rama determinada [10]. Esta técnica requiere por tanto utilizar una fibra específica en el despliegue para la detección de fallos.

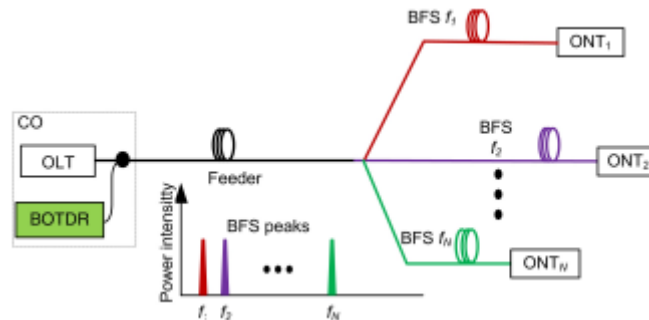


Figura 3: Arquitectura de la técnica basada en OTDR Brillouin

Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, "Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey", IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, n° 2, páginas 943-958, 2013.

### 6.3. Técnica basada en OTDR integrado

Esta técnica incluye un mini OTDR en las ONUs. Gracias a esto no son necesarios elementos de test separados o OTDR sintonizables en el CO. Sin embargo, el uso de este dispositivo obliga a realizar cambios en el hardware. Este método utiliza un láser de 1550 nm en cada ONU de las diferentes ramas para posteriormente detectar reflexiones y dispersiones.

Según se trate del enlace ascendente o descendente, el tráfico es por ráfagas o continuo respectivamente, así que es necesario proponer dos técnicas distintas para cada caso. En el enlace ascendente se utiliza el método estándar con OTDR para monitorizar la parte de red de las ONUs, insertando el pulso entre dos ráfagas utilizando un tiempo de espera. En el enlace descendente se utiliza el método del OTDR con seno modulado. En este caso no es necesario tiempo de espera.

La ventaja que proporciona este método es no tener que utilizar un OTDR sintonizable pero tiene como desventajas la discontinuidad en el enlace ascendente. Además, esta técnica depende mucho del equipamiento de las ONUs para monitorizar. Cada error o desconexión de la ONU puede provocar la no localización del error o la localización errónea [10].

El modelo utilizado para describir la monitorización con el OTDR integrado se puede resumir con la figura 4 [11]:



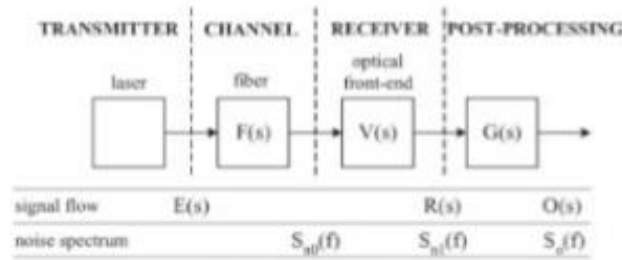


Figura 4: Diagrama del modelo utilizado en técnica de OTDR sintonizable

Bert De Mulder, Wei Chen, Johan Vandeweghe and Xing-Zhi Qiu, "Nonintrusive Fiber Monitoring of TDM Optical Networks", Journal of Lightwave Technology, Volumen 25, n°1, páginas 305-317, Enero 2007.

La señal del láser se inyecta en el sistema y su transformada de Laplace es  $E(s)$ . Debido a las imperfecciones de la fibra se crean reflexiones que se representan como  $F(s)$ . La señal refleja pasa por el OTDR y crea la función de transferencia de  $V(s)$ . Por último, es necesario un postprocesado y un filtrado digital representados por  $G(s)$  para monitorizar la red.

#### 6.4. Técnica Active Bypass

Se basa en la utilización de señales de control transmitidas desde el CO para diferenciar la rama que hay que analizar dentro de la red, mediante un selector óptico y cables de cobre dentro de la fibra óptica. En funcionamiento normal, la señal de monitorización es transmitida con la señal de datos en dirección descendente usando dispositivos WDM. La retrodispersión es monitorizada por un detector y transmitida al sistema de control. El sistema de control compara los resultados con una referencia. Si no coinciden en esa rama existe un fallo.

Aunque esta técnica es capaz de detectar y localizar los fallos mediante el OTDR, tiene la desventaja de requerir potencia óptica y eléctrica adicional para compensar las pérdidas y alimentar los componentes activos que utiliza. Esto se contradice con la ventaja que tienen las redes PON que están compuestas sólo de componentes pasivos [10].

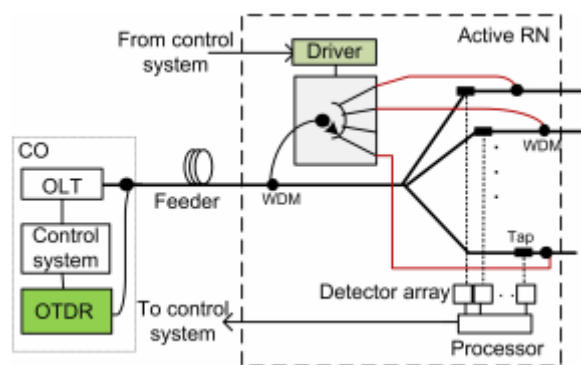


Figura 5: Arquitectura de la técnica basada en Active Bypass

Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, "Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey", IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, n° 2, páginas 943-958, 2013.

### 6.5. Técnica Semi-Passive Bypass

Con esta técnica es posible eliminar la necesidad de potencia adicional y por tanto no es necesaria la fuente de alimentación. Esto es posible gracias a que el *switch* óptico llamado PSC en el RN, es alimentado por una señal óptica de alta potencia transmitida remotamente desde el CO en paralelo con las señales de datos y monitorización, a través de la misma fibra. El *switch* óptico selecciona la rama correspondiente y el OTDR del CO mide la potencia de la luz que se refleja en la rama que ha seleccionado el *switch*. Estas medidas se comparan con una referencia y si no son iguales sabemos que hay un fallo en esa rama [10].

El RN es teóricamente pasivo, sin embargo se utiliza un convertidor fotovoltaico y una unidad de control para el *switch*. Para cambiar el estado del *switch* se envía una señal de alta potencia del CO al RN. En el RN el convertidor fotovoltaico convierte la señal a eléctrica y esta señal es usada por la unidad de control para cambiar el estado del *switch*.

En caso de existir un error, éste es detectado en el CO y el ONT. El *switch* de la correspondiente ONT cambia de estado remotamente. Además, para localizar el fallo se utiliza la señal del OTDR en la rama correspondiente.

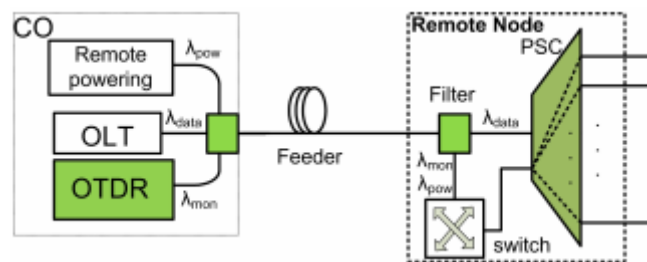


Figura 6: Arquitectura de la técnica basada en Semi-Passive Bypass

Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, "Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey", IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, n° 2, páginas 943-958, 2013.

### 6.6. Técnica basada en reflector de referencia

El objetivo de este modelo es mejorar el rango dinámico que tenemos habitualmente en un OTDR. Para ello se utiliza un OTDR en la CO y un elemento reflectivo al final de cada rama. Los reflectores se pueden configurar de dos maneras distintas. La primera posibilidad es colocarlas a la entrada de la ONU actuando de filtros, reflejando la longitud de onda OTDR y dejando pasar todas las demás. La segunda es disponerlos como espejos en la rama del dispositivo WDM, como se muestra en la figura 7. En ambos casos las señales con longitudes de onda de monitorización se reflejan hacia el OTDR donde son analizadas

Esta técnica, en una situación en la que se encuentran errores en diversas ramas a una distancia parecida tiene el inconveniente de confundir los picos del cálculo del OTDR. Por tanto, no es muy útil para los operadores. Sin embargo, esta técnica es de las más utilizadas por su simplicidad y facilidad de implementación. Como las anteriores, también se describe en [10]. Se necesita un inventario que identifique cada rama con la longitud de onda del reflector de referencia que se asocia a cada una de ellas.

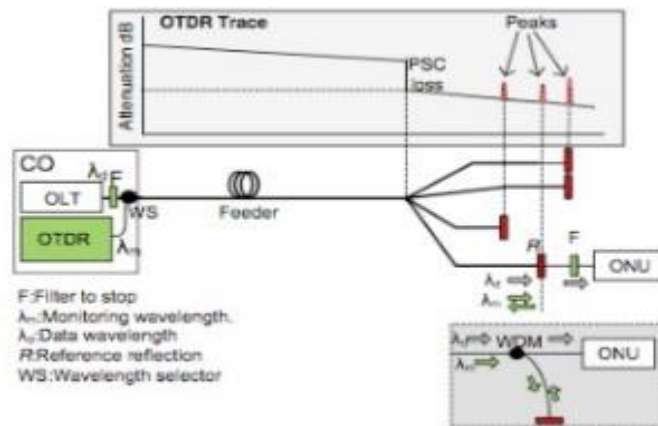


Figura 7: Arquitectura de la técnica basada en reflector de referencia

Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, "Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey", IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, n° 2, páginas 943-958, 2013.

### 6.7. Técnica basada en SRE

Es una técnica alternativa a la basada en elementos reflectivos, usando elementos reflectivos conmutables cerca de cada ONU cuyo objetivo es identificar de qué rama es cada señal obtenida por el OTDR que se encuentra en la CO. Cada SRE está formado por un *switch* fotodiodo óptico (estado no reflectivo por defecto) por un lado y un espejo por el otro. La posición del *switch* está controlado por el fotodiodo.

Cada SRE es conmutado remotamente desde la CO enviando en enlace descendente un código de señal. Si el fotodiodo recibe el código de una ONU, el SRE de dicha ONU cambia al estado reflectivo y los demás SRE permanecen en los estados no reflectivos. De esta manera, no habrá más de un pico al mismo tiempo en la señal que genera el OTDR. Para mejorar el rango dinámico del OTDR, es posible utilizar un amplificador *Raman* fijando una longitud de onda en el láser que permita a la longitud de onda del OTDR, estar dentro del ancho de banda del amplificador *Raman*. Este paso tiene el inconveniente de tener que utilizar componentes activos [10].

El coste es bastante alto ya que utiliza un conmutador óptico y un detector óptico en cada rama. No nos permite localizar donde se encuentra el error ya que se entremezclan señales reflejadas de varias ramas.

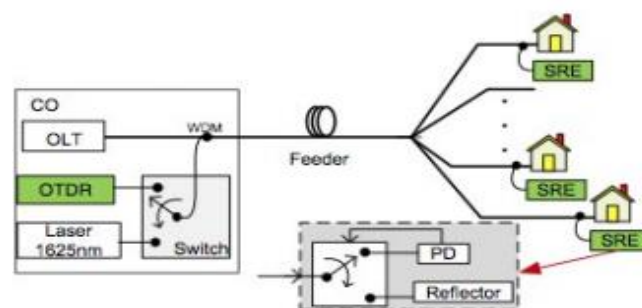


Figura 8: Arquitectura de la técnica basada en SRE

Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, "Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey", IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, n° 2, páginas 943-958, 2013.

### 6.8. Técnica basada en SL-RSOA

Esta técnica se basa en el análisis de las señales que generan los SL-RSOA [10]. Estos dispositivos son capaces de generar en cada ONU las señales ascendentes de datos y monitorización por medio de una cavidad externa. Simultáneamente estas señales pueden ser detectadas en los OLTs mediante una cavidad de frecuencia distinta. La frecuencia de la cavidad de la ONU se define del siguiente modo: el ruido generado por el RSOA se inyecta en un dispositivo FBG que se encarga de reflejar una señal de ruido a la longitud de onda específica. Un FBG es un dispositivo que refleja las longitudes de onda especificadas de una señal. Está construida a partir de un pequeños segmento de fibra óptica que refleja esas longitudes de onda y transmite el resto. Esto se consigue mediante una variación periódica del índice de refracción en el núcleo de la fibra que genera un espejo dieléctrico.

Para un número de clientes mayor que 16, esta detección simultánea produce una pérdida de potencia excesiva en el enlace ascendente. Para reducir la influencia de las señales de monitorización se plantea definir time slots para la transmisión de estas señales por parte de las ONUs. Con esto se reduce la potencia perdida en el enlace ascendente. Esta técnica no es aplicable a todas las PON y además es necesaria una extensión del protocolo. Otro aspecto a tener en cuenta es la interferencia que se produce entre las señales de datos y monitorización en el enlace ascendente.

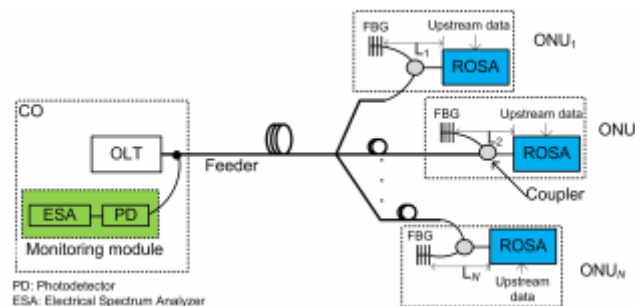


Figura 9: Arquitectura de la técnica basada en SL-RSOA

Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, "Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey", IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, n° 2, páginas 943-958, 2013.

### 6.9. Técnica basada en señales moduladas reflectivas

Esta propuesta plantea la utilización de *switchs* ópticos denominados MEMS y un espejo óptico situados en las cercanías de las instalaciones del cliente [10].

El funcionamiento de este sistema comienza cuando se transmite una señal de monitorización desde el CO. Esta señal se refleja en el espejo y se modula en el MEMS. La señal de monitorización generada consiste en unos pulsos transmitidos en el tiempo. Esta señal funciona como un identificador de la rama que corresponda. Si esta señal se atenúa o se pierde, esto quiere decir que existe un fallo en esa rama y es necesario un OTDR para localizar el lugar exacto del fallo.

El uso de MEMS conlleva la utilización de una señal eléctrica para controlar su operación que contrasta con el espíritu de las redes PON.

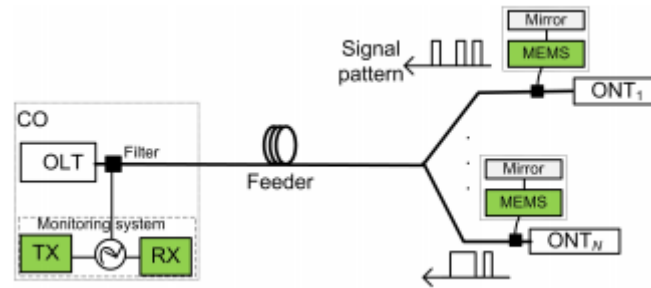


Figura 10: Arquitectura de la técnica basada en señales moduladas reflectivas

Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, "Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey", IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, n° 2, páginas 943-958, 2013.

### 6.10. Sistema de monitorización de roturas en fibras FBMS

A continuación se desarrolla una técnica en tiempo real bastante diferente en cuanto a los procedimientos que utiliza:

El método comprende hasta siete módulos [12] que se muestran en la figura 11:

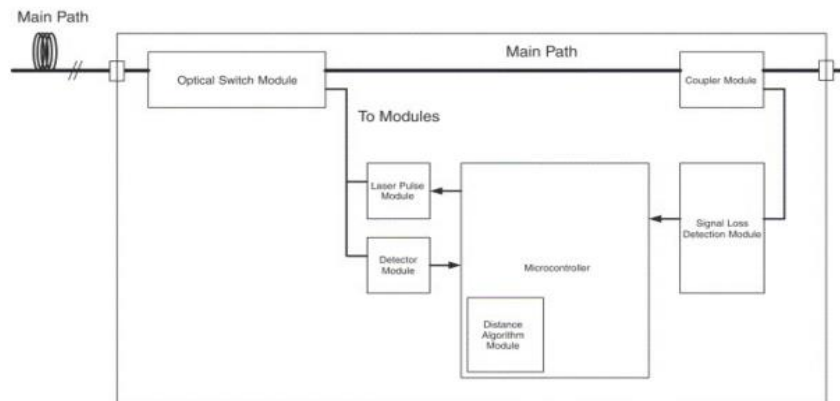


Figura 11: Diagrama de bloques de FBMS

Golnabi, H.; Bahar, M.; Razani, M.; Abrishami, M.; Asadpour, A., "Optics and Lasers in Engineering" Volumen 45, Capítulo 1, páginas 126-130, Enero 2007.

El microcontrolador es el corazón del dispositivo, ya que controla el *switch*, el módulo detector, el módulo *display* y el algoritmo de proceso de la distancia.

El *loss detection module* se encarga de activar el microcontrolador cuando detecta una señal por debajo de -45 dBm. Cuando se activa el microcontrolador, éste acciona el *switch* pasando la señal a la parte de los módulos.

El microcontrolador activa el *Laser Pulse Module* que envía una secuencia de módulos por la fibra para detectar las reflexiones que producen los fallos o errores en la fibra mediante el *Detector Module*. El detector envía las señales al *Distance Algorithm Module* que calcula la distancia a la que se encuentra el fallo en la fibra. Este método ofrece mayor exactitud que otros métodos como el OTDR.

### 6.11. Detección de fallos por realimentación óptica en láseres caóticos

Esta técnica se basa en la transmisión de una señal de monitorización por parte de un láser semiconductor cercano a la CO. En cada rama utiliza un FBG que refleja la señal de monitorización a diferente longitud de onda para poder identificarlas.

El funcionamiento general de éste método es el siguiente [13]: cuando no hay error el láser transmite y los FBG reflejan una señal que sirve para identificar cada rama. Si hay error en algún lugar de la red, se refleja la señal cuando llega al lugar del fallo hacia el láser creando un estado de “chaos” al sumarle la señal reflejada a la ya emitida de monitorización. Se trata teóricamente como un espejo frente a un láser a una distancia determinada, con el que se puede calcular la distancia a la que está el error mediante la ACF.

Este método ofrece como ventaja, que es capaz de detectar y localizar los fallos simultáneamente lo que permite que el tiempo de test sea menor y el sistema sea menos complejo.

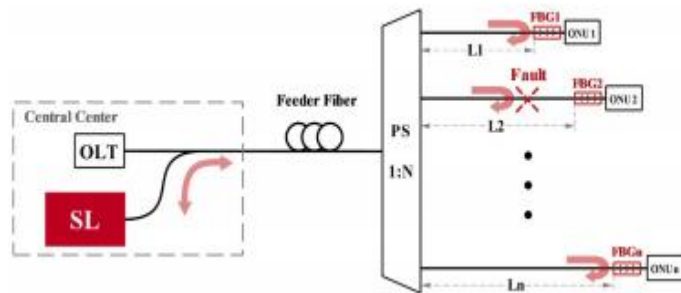


Figura 12: Arquitectura de la técnica de detección de fallos por realimentación óptica en láseres caóticos

Tong Zhao Hong Han JianGuo Zhang XiangLian Liu XiaoMing Chang AnBang Wang YunCai Wang. “Precise Fault Location in TDM-PON by Utilizing Chaotic Laser Subject to Optical Feedback”, IEEE Photonics Journal, Volumen 7, Capítulo 6, Diciembre 2015.

### 6.12. Técnica de monitorización de fallos con soporte para servicios móviles

Se trata de una técnica en redes TDM-PON, que intenta resolver la alta atenuación e incapacidad de diferenciar los errores en distintas ramas que tienen los métodos basados en OTDR sin tener que realizar modificaciones o añadir elementos en el ODN y permitiendo la compatibilidad con los servicios móviles. Este método realiza la monitorización de forma remota y en tiempo real [14].

La arquitectura que utiliza esta técnica se puede observar en la figura 13. El principio fundamental de esta técnica es la medida de la potencia óptica en ambos sentidos desde el FMS al MP y viceversa. El FMS del CO envía una señal de longitud de onda continua  $\lambda_0$  a través de un transmisor TXo hacia el MP de cada rama mediante un láser LD. El WDM se encarga de combinar la señal de datos que viene del OLT y la señal de monitorización del FMS. El MP contiene un OF que combina las señales de monitorización y además un dispositivo receptor RXo que mide la potencia óptica recibida de la señal de longitud de onda  $\lambda_0$ . El MP contiene transmisores TXi que transmite una señal continua de longitud de onda  $\lambda_i$  en cada MP de cada ONU con dirección al FMS del CO. En el FMS también se mide la potencia óptica de esta señal

recibida de cada MP a través de receptores RXi. En el MP las señales se encaminan por los puertos correspondientes a través de un circulador C.

Cada vez que se produce un fallo en un punto de la red, esta técnica calcula el tiempo que tarda en propagarse este fallo hacia el FMS y el MP de cada ONU, permitiendo así la localización de dicho error. Esto es posible gracias a dos relojes sincronizados CLKo y CLKi colocados en la CO y el MP respectivamente. Una gran peculiaridad de este método es que tiene la capacidad de funcionar con servicios móviles. Para ello la información de los cálculos de los tiempos se transmite al sistema O+M del operador usando un canal de comunicación local en la CO y a través de un sistema inalámbrico en la ONU.

En resumen, esta técnica tiene diversas ventajas como el bajo coste, minimización de número de componentes utilizados, evita el solapamiento de señales que se produce en los métodos basados en OTDR, no es necesaria la modificación del ODN por parte del operador, tiene compatibilidad con servicios móviles y una precisión en la localización de entre 10 y 20 metros.

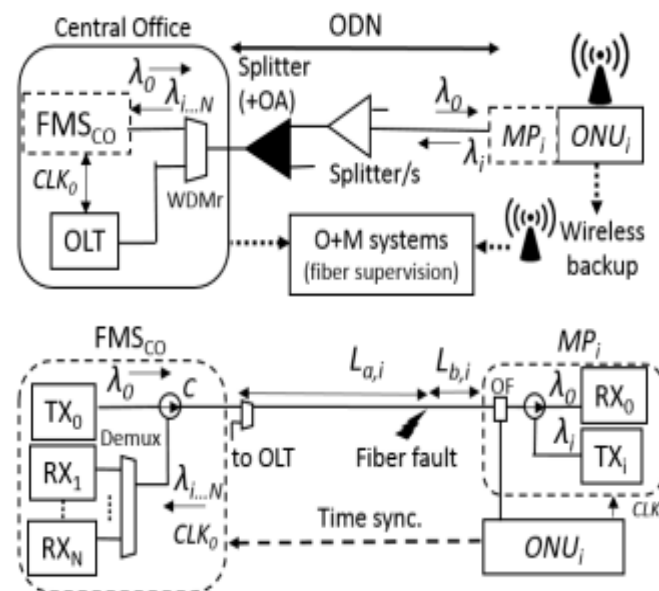


Figura 13: Arquitectura de la técnica con soporte para servicios móviles

J. Montalvo, A. Tapetado, D. S. Montero and C. Vázquez, "New Fiber Supervision Technique for Passive Optical Networks Supporting Mobile Services", IEEE Photonics, páginas 1-4, 2015.



## Capítulo 7. Técnicas de Monitorización para la Detección Automática de fallos en redes WDM-PON

Como hemos visto, existen diversas técnicas de monitorización automáticas de fallos que se aplican en redes TDM-PON. En este apartado, se explicarán técnicas para la detección automática de fallos específicamente en redes WDM-PON.

### 7.1. Técnica basada en elementos reflectivos

Se trata de un método diseñado para detectar en qué fibra se ha producido el fallo pero no es capaz de distinguir el lugar exacto, diseñado para redes WDM-PON.

Utiliza una fuente de luz de banda ancha en el OLT y un reflector óptico en cada ONU. Al final de la fibra se sitúa un divisor óptico para alimentar todas las fibras equitativamente. La señal óptica de monitorización se compone de tantas longitudes de onda como fibras finales haya en la red. Cuando esta señal llega al filtro WSC, éste solo acepta la longitud de onda correspondiente a esa ONU, bloqueando el resto. El elemento reflectivo se encarga de reflejar la señal de monitorización.

Cuando se detecta un fallo en una rama la señal es reflejada con menor potencia al dispositivo de monitorización, con el que se detecta el error. Si el fallo se encuentra en la fibra de alimentación, se observará la pérdida de potencia en todas las ramas y por tanto es fácil detectarlo. Normalmente se utiliza un SOA como amplificador para compensar las pérdidas [15].

Las ventajas fundamentales son que evita tener que aumentar el coste asociado al uso de OTDR sintonizables y además debido a la presencia de los reflectores, el proceso de monitorización no afecta al proceso de transmisión. Las mayores desventajas son que no se puede utilizar en redes WDM-PON normales ya que utiliza divisores ópticos en vez de AWG en los RN, lo que provoca pérdidas de dispersión. Los elementos reflectores aumentan el coste y el sistema no es capaz de localizar los fallos [15].

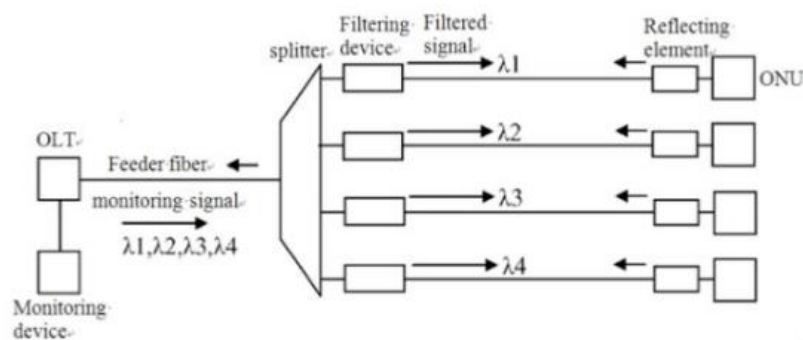


Figura 14: Arquitectura de la técnica basada en elementos reflectivos

Min Cen, "Study on Supervision of Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network Systems", Master of Science Thesis Stockholm, página 31, 2011.



## 7.2. Técnica basada en OTDR sintonizable

Diseñada para redes WDM-PON y también válida para redes TDM-PON [10]. Las señales de datos enviadas desde el OLT, pasan por el WDM y se encaminan por las fibras de distribución mediante un divisor óptico. En estas fibras se encuentran los filtros ópticos y elementos reflectivos de monitorización que se encargan de permitir el paso de la longitud de onda de cada ONU y de reflejar la señal de monitorización, respectivamente.

Si no hay ningún fallo en la red la señal se reflejará por el dispositivo de monitorización y si hay algún fallo se reflejará con las pérdidas correspondientes. En caso de que el fallo se encuentre en la fibra de alimentación, existirán pérdidas en todas las señales de retorno, lo que se puede detectar fácilmente. Hasta aquí, el proceso es prácticamente idéntico al que se utiliza con elementos reflectivos. La diferencia se encuentra en que cuando se detecta algún fallo, se activa el ordenador de control y el OTDR lanza una señal con una longitud de señal específica que atraviesa el WDM, la fibra de alimentación, el divisor, el filtro y llega a la fibra final. De la señal reflejada que se obtiene se puede sacar la traza del OTDR. Al utilizar un divisor óptico y el OTDR sintonizable, tendremos mayores pérdidas de inserción [15].

En este caso ya se puede detectar la localización del fallo, aunque lleva más tiempo que el proceso de detección de fallos. Lo más eficiente en esta técnica es que separa la detección de la localización ya que ésta se activa sólo cuando se detecta un fallo. Sin embargo, el mayor inconveniente es el coste de los OTDR sintonizables.

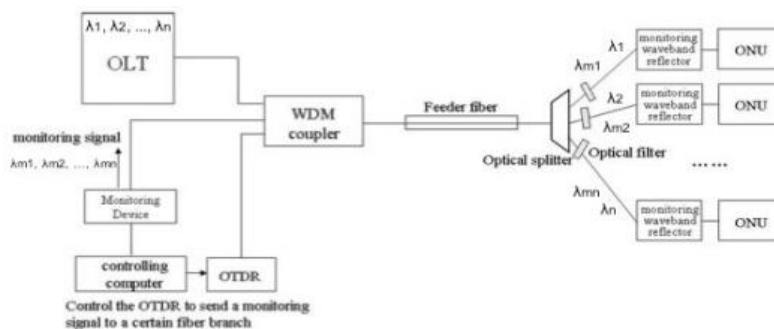


Figura 15: Arquitectura de la técnica basada en OTDR sintonizable

Min Cen, "Study on Supervision of Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network Systems", Master of Science Thesis Stockholm, página 32, 2011.

## 7.3. Solución basada en multiplexor DWDM

El sistema se inicia con un aislador óptico que bloquea las señales reflejadas hacia las fuentes de luz. Se utiliza como divisor un AWG y, entre éste y el aislador se coloca un DWDM y un conmutador OSW que selecciona una señal de monitorización específica para transmitirla dentro del sistema [15].

Con este método se pueden enviar las señales de datos y la de monitorización por el mismo puerto mientras se mantenga un espaciado de canal suficiente. Las señales de monitorización se generan en el OTDR cuyo espectro se define en el DWDM y a continuación se envía al conmutador óptico. El OTDR solo puede trabajar con una ONU al mismo tiempo.

En este método, se utiliza un AWG en vez de un divisor óptico por ser más rentable y en este caso se consigue que el OTDR sea sintonizable mediante el DWDM y el conmutador óptico. Utilizando este método tenemos el problema de que la detección y la localización de los fallos se realizan al mismo tiempo. Además, el proceso de monitorización afecta al modo normal de transmisión y también es necesaria una fuente de banda ancha en el OTDR. [15].

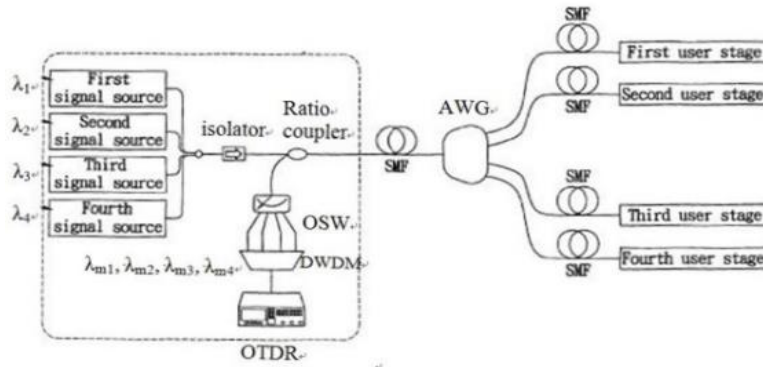


Figura 16: Arquitectura de la técnica basada en demultiplexor DWDM

Diagrama de bloques de la técnica basada en multiplexor DWDM. Min Cen, "Study on Supervision of Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network Systems", Master of Science Thesis Stockholm

#### 7.4. Solución basada en módulo de adaptación longitud de onda

También denominado FPM. Este sistema propone el uso de OTDR y OTM para obtener una información completa del estado de la red. Es compatible con redes TDM-PON y WDM-PON.

Para aplicar esta técnica es necesario proponer una arquitectura diferente a la habitual en las redes PON. En primer lugar, es necesario utilizar un EWAM junto al OTDR que sintoniza la señal OTDR para poder distribuirla por todas las fibras. Otra diferencia importante es la incursión del sistema OTM que proporciona parámetros medibles como la potencia transmitida y recibida en el OLT y el ONT. La unidad central del OTM, además controla el OTDR, el EWAM y el conmutador en la CO. Combinando esta técnica y el OTDR se dibuja una traza completa de los fallos de la red.

El funcionamiento general es el siguiente: primero la señal es enviada por el OTDR y cruza el EWAM, donde se convierte a longitud de onda. La longitud de onda nominal coincide con la del filtro RN, para encaminarse al grupo de fibras adecuado. El EWAM permite obtener un ancho de banda más estrecho lo que consigue evitar el solapamiento de longitudes de onda en las redes WDM-PON. Las mediciones se realizan periódicamente o bajo de demanda. En cuanto se detecta un fallo, el sistema FPM configura los parámetros del OTDR y del EWAM y lanza las mediciones. La señal retornada se recibe en el OTDR donde se genera la magnitud y el tipo de evento comparándolas con las de referencia en el OTM. Si se sobrepasa un cierto umbral, el OTM informa cual es la fibra o fibras defectuosas, indicando la localización del fallo así como el tipo de fallo y su magnitud. [15].

### 7.5. Solución que utiliza transmisores LED de subida

Este método utilizado en redes WDM-PON se basa en un sistema con los siguientes bloques [15]: un módulo de supervisión en la CO con una unidad de control, un generador de pulsos, un filtro paso banda sintonizable y un receptor OTDR. La mayor novedad es el uso de un LED en cada ONU para generar la señal de subida.

Cuando la potencia óptica de la señal de subida, en un canal específico disminuye, la unidad de control activa el conmutador y conecta el generador de pulsos, el cual modula las señales de bajada. Utilizando estas señales, se pueden detectar y localizar fallos sin usar OTDR sintonizables.

Si el fallo se produce en la fibra de alimentación, la unidad de control selecciona aleatoriamente un canal de subida y lo modula con la señal de medida. Cuando hay varios fallos, se atiende a los canales según su prioridad para activar el proceso de localización. Tiene que existir una diferencia de menos de 4 GHz de separación entre la señal de datos y la señal de monitorización.

Este modelo utiliza un AWG que presenta menos pérdidas que el divisor óptico y están separados los procesos de detección y localización de fallos lo que lo hace más eficiente. Los problemas que plantea son la utilización de un conmutador eléctrico para seleccionar entre las señales de datos y de monitorización y la obligación de parar la transmisión de datos en el proceso de localización de fallos.

### 7.6. Solución que utiliza transmisores VCSEL de subida

Este sistema utilizado sobre redes WDM-PON se basa en un sistema con los siguientes bloques [12]: en la CO se dispone de una fuente de banda ancha de baja potencia, un módulo *lock-in* y una serie de detectores de bajo ancho de banda. En las ONU se utilizan láseres de cavidad vertical VCSEL para la transmisión de subida [15].

La fuente de luz de banda ancha se centra en longitudes de onda distintas en bajada y en subida, y es modulada con una señal alterna por el elemento *lock-in*. En bajada, la fuente de luz se divide en múltiples canales de monitorización mediante un AWG, tantos como ONUs haya en la red. Una vez que la luz llega a la ONU la señal se detecta y se usa para activar ópticamente el transmisor de subida VCSEL. Este contiene los DBR, que reflejan cualquier longitud de onda distinta a la de emisión del láser para enviar la señal de monitorización. Las señales de monitorización que han sido reflejadas de las ONU se separan mediante un filtro CWDM en los puertos de salida del primer AWG. Cada canal de monitorización se identifica mediante un detector de bajo ancho de banda y se devuelve dentro del *lock-in* para la medición. Este módulo singulariza la componente de corriente continua y rechaza las señales de ruido de las otras longitudes de onda. La potencia de las señales de monitorización se puede medir mediante el *lock-in* y determinar el estado de las fibras de alimentación y distribución.

### 7.7. Técnica de auto-referencia por radiofrecuencia

Esta técnica está basada en modulaciones de intensidad de radiofrecuencia y en técnicas de medición de auto-referencia con FBGs [16]. Una fuente de luz de banda ancha BLS es modulada en intensidad por la señal RF en la unidad de monitorización y dirigida hacia

la fibra por el *switch/filter*, llamado de esta manera porque se puede tratar de un conmutador, un multiplexador/demultiplexador o un divisor.

En cada fibra de distribución, tras el RN, se sitúa un primer FBG ( $\lambda_{R(i)}$ ), el cual envía una señal identificadora de esa fibra y posteriormente, un segundo FBG ( $\lambda_{M(i)}$ ) que permite obtener la atenuación óptica ( $H_i$ ) de la fibra en esa rama ya que el FBG refleja la señal atenuada. La longitud de onda central y el ancho de banda de los FBG deben estar dentro de la banda de paso de cada puerto de los dispositivos ópticos pasivos instalados en el RN y también del elemento óptico *switch/filter* en la CO. Las reflexiones de los FBG llegan a la unidad de monitorización, y a partir de estas se lleva a cabo un procesamiento de señal utilizando un filtro analógico y un amplificador. De este procesamiento se obtiene el parámetro de auto-referencia ( $R_i$ ).

La respuesta de la configuración de monitorización depende de las longitudes de onda anteriores y de sus desplazamientos de fase  $\Omega_{R,i}$ ,  $\Omega_{M,i}$  (radianes). El desplazamiento de fase de la longitud de onda de monitorización  $\Omega_{M,i}$  es la suma del desplazamiento electrónico, que puede ser seleccionado en la unidad de monitorización ajustando el filtro analógico, y el desplazamiento constante causado por el tiempo de propagación en la fibra de distribución. El desplazamiento de fase causado por el tiempo de propagación de la fibra de alimentación no se considera en el modelo, ya que es el mismo tiempo para las longitudes de onda de referencia y las de monitorización. El  $R_i$  se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$R_i = \frac{V_0(\Omega_{M,i})|_{\Omega_{R,i}=0}}{V_0(\Omega_{R,i})|_{\Omega_{M,i}=0}}$$

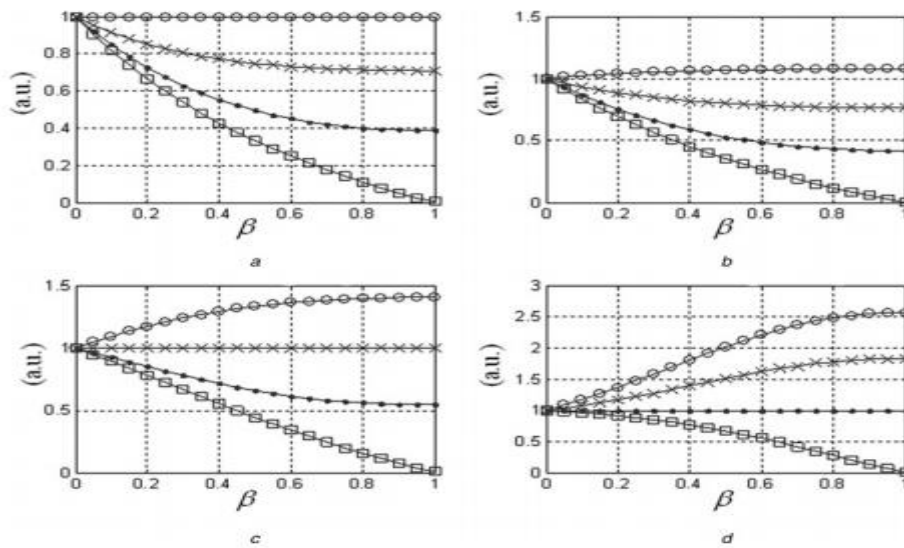


Figura 17: Curvas teóricas del parámetro R contra el coeficiente de atenuación óptica en las fibras adiferentes desplazamientos de fase: (o)  $\Omega_M = 0$ , (x)  $\Omega_M = \frac{\pi}{4}$ , (.)  $\Omega_M = \frac{3\pi}{4}$ , (□)  $\Omega_M = \pi$ , (a) R para  $\Omega_R = 0$ , (b) R para  $\Omega_R = \frac{\pi}{4}$ , (c) R para  $\Omega_R = \frac{\pi}{2}$ , (d)  $\Omega_R = \frac{3\pi}{4}$

J. Montalvo, D.S. Montero, C. Vázquez, J.M. Baptista, J.L. Santos "Radio-frequency self-referencing system for monitoring drop fibres in wavelength division multiplexing passive optical networks", Volumen 4, Capítulo 6, páginas 226– 234, IET Optoelectron., 2010.

Para un valor fijo de la frecuencia de modulación, el parámetro de auto-referencia  $R_i$  para una determinada fibra  $i$  solo depende del parámetro  $\beta$ , que se expresa como:

$$\beta_i = \frac{m_{M,i} R_{M,i} d_{M,i}}{m_{R,i} R_{R,i} d_{R,i}}$$

Donde  $m_R$ ,  $R_{R,i}$ ,  $d_{R,i}$  son el índice de modulación RF, la reflectividad del FBG y la respuesta del fotodetector a la longitud de onda de referencia  $\lambda_{R(i)}$  para una fibra de distribución  $i$ , respectivamente,  $m_M$ ,  $R_{M,i}$ ,  $d_{M,i}$  son los parámetros similares correspondientes a la longitud de onda de monitorización  $\lambda_{M(i)}$ .  $H_i$  es el parámetro de atenuación de cada fibra.  $\beta$  es insensible a las variaciones de la potencia que ocurren entre la CO y el RN así que el parámetro es robusto. El parámetro  $R_i$  es muy flexible ya que puede ser modificado para variar la sensibilidad y linealidad con respecto a la atenuación óptica de la fibra de distribución ( $H_i$ ).

Este parámetro proporciona la medida de la pérdida óptica de cada fibra. Este método tiene las ventajas de la auto-referencia y del aumento de la sensibilidad para la monitorización de sistemas de acceso PON, si bien no permite localizar el punto donde se produce el fallo y necesita un inventario de los diferentes reflectores que se utilizan en cada fibra. Sin embargo, si nos permite averiguar en qué rama se producen los fallos.

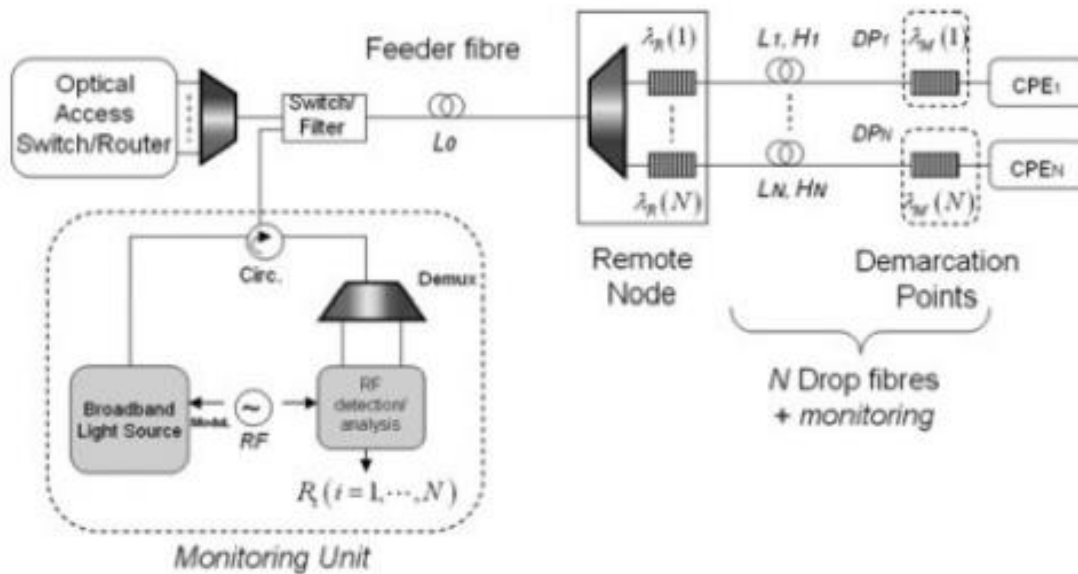


Figura 18: Arquitectura de técnica de auto-referencia por radiofrecuencia

J. Montalvo, D.S. Montero, C. Vázquez, J.M. Baptista, J.L. Santos "Radio-frequency self-referencing system for monitoring drop fibres in wavelength division multiplexing passive optical networks", Volumen 4, Capítulo 6, páginas 226–234, IET Optoelectron., 2010.



### **7.8. Técnica basada en la multiplexación óptica por división de código**

Este tipo de monitorización basada en codificación óptica se utiliza para la supervisión centralizada de la calidad del enlace en redes ramificadas y en especial en redes PONs. Se basa en el estándar OCDMA. Cada rama de la PON se diferencia con un codificador óptico diferente situado al final de cada fibra [15].

La CO transmite un pulso óptico en la banda de mantenimiento estándar (Banda U: 1625-1675 nm). Este pulso se divide en subpulsos cuando llega al divisor óptico del RN y cada uno viaja por una fibra. Después los subpulsos se codifican y se reflejan de vuelta al CO mediante un dispositivo que codifica y refleja el subpulso llamado CM. Cada CM tiene un selector de longitud de onda que identifica cada fibra de distribución y separan las señales de datos y monitorización.

Los datos de monitorización los contiene la señal reflejada codificada. Este sistema funciona de tal manera que cuando se produce un fallo en la fibra el subpulso no llega a su CM, por lo que no se codifica. Sin embargo, si no existe ningún error en la fibra el subpulso sí llega y se produce la codificación, y entonces se refleja de vuelta a la CO. En esta situación se identifica un pico de autocorrelación.

Este sistema es compatible con cualquier red en cuanto a formato de datos y tasa de bits, y es fácilmente ajustable en cuanto a sensibilidad. El mayor inconveniente es que esta técnica no permite localizar el lugar del fallo en la red. Permite una monitorización en tiempo real desde la CO independientemente del estado de la ONU. Actúa transparentemente respecto a los formatos de datos y tasas de bits.

### **7.9. OFDR Optical Frequency Domain Reflectometer**

Se trata de enviar una señal modulada en frecuencia y medir las interferencias que producen los componentes de la red. Cada componente interferente crea un impulso de distinta frecuencia. La señal inyectada cambia de frecuencia de forma lineal en el tiempo. Cuando la composición de las señales interferentes llega al OFDR se pasa al dominio de la frecuencia mediante la Transformada de Fourier y con esta señal ya se pueden estudiar las roturas o fallos de la red. Con esta técnica, también es posible medir la temperatura ambiente a la que se producen las interferencias [11].

Posteriormente la señal compuesta se modula y se filtra. Por último se le aplica la IFFT con lo que se puede observar el espectro de las reflexiones.

Es compatible con redes WDM-PON sin realizar modificaciones. Se puede considerar un sistema análogo a OTDR (dominio del tiempo) pero con un tiempo de respuesta algo menor [17].

### **7.10. Sistema de monitorización óptica preventiva con reflectores comunes**

Esta técnica surge como una evolución de la técnica de auto-referencia por radiofrecuencia y que por tanto sigue siendo un método de bajo coste, pero a diferencia de su predecesor utiliza un único reflector en cada ONU, reduciendo así el número de componentes utilizados y su complejidad, y por tanto los costes. Además esta técnica



permite realizar medidas para su monitorización cuando la red se está utilizando para dar servicio a clientes.

Este método trabaja habitualmente con OLTs en redes WDM-PON que suelen ser redes FTTH. La estructura de la técnica se representa en la figura 19 [18]. El lado del operador está formado por un OMM que genera la señal de monitorización, un *switch* óptico para seleccionar la ODN que se quiere testear y un WM que combina las señales de datos y las de monitorización. En el ODN se añade un reflector  $B_0$  a la entrada de un AWG con  $N$  salidas. Finalmente al final de cada rama se utiliza un reflector de longitud de onda única para todas las ramas ( $B$ ) que permite solucionar los problemas de inventario de longitudes de onda que teníamos en la técnica de auto-referencia por radiofrecuencia.

Con respecto al funcionamiento de esta técnica, se transmite una señal de referencia con longitud de onda  $\lambda_0$  y un BLS transmite una señal de monitorización. Estas dos señales se multiplexan en el WM y se transmiten en una banda diferente a las señales de datos. La señal de referencia se refleja en  $B_0$  y es recibida por el OMM. Por otro lado, la señal de monitorización se divide en diferentes señales de longitud de onda distintas  $\lambda_{m_i}$  ( $i$  es el número de cada rama) mediante el AWG, para cada rama. La señal de monitorización es reflejada con estas longitudes de onda por los reflectores  $B$  correspondientes. Estas reflexiones son recibidas por el OMM.

Para cada usuario, las reflexiones de la señal de referencia  $\lambda_0$  y de monitorización son procesadas por el OMM y son obtenidas las medidas de auto-referencia de fase  $\phi_i$ , que son obtenidas mediante el cálculo de la diferencia de fase entre las señales de longitud de onda  $\lambda_0$  y las reflejadas por los receptores  $B$ . Posteriormente, se obtiene la atenuación de cada rama que depende de las pérdidas ópticas del AWG en cada puerto, de la atenuación de la fibra y de las pérdidas de cada reflector  $B$ . En cada ODN se obtiene la fase eléctrica en frecuencia entre las señales reflejadas de referencia  $\lambda_0$  y las de monitorización  $\lambda_{m_i}$  que son recibidas en el OMM.

El sistema tiene la capacidad de medir la atenuación de 32 fibras en 8 segundos y es fácilmente ajustable en cuanto a linealidad y sensibilidad de la atenuación óptica. Las señales de monitorización y datos se pueden transmitir simultáneamente, ya que las longitudes de onda de cada una de ellas se encuentran en diferentes bandas de longitud de onda. Además se reduce el número de componentes y también la complejidad de la red. Los inconvenientes son que no puede localizar el lugar exacto de los fallos y sólo funciona cuando el equipo del cliente está en servicio.

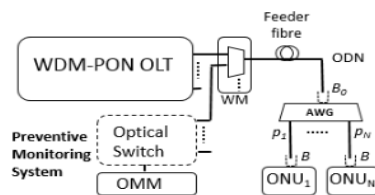


Figura 19: Arquitectura de una red WDM-PON a la que se aplica la técnica de monitorización óptica preventiva con reflectores comunes

J. Montalvo, A. Tapetado, D.S. Montero, C. Vázquez, "WDM-PON Preventive Optical Monitoring System with Colourless Reflectors", Optical Fiber Conference, 2016.

## Capítulo 8. Aplicaciones comerciales

Después de haber explicado distintas técnicas de monitorización de fallos tanto manuales como automáticas, también es interesante conocer algunas de las aplicaciones o sistemas que están a la venta en el mercado. Estos tres sistemas que se explican a continuación, utilizan técnicas o métodos explicados en apartados anteriores de este documento.

### 8.1. WDM-DOCTOR: HR-OSA

La empresa PROMAX propone un método basado en un analizador de señal con el que se pueden observar los fallos en una red óptica. El analizador está formado por un filtro sintonizable y un receptor óptico como elementos principales. Es el propio filtro interno el que se sintoniza a lo largo de todas las frecuencias de los diversos usuarios y va obteniendo así la potencia en todas y cada una de ellas. Es un sistema diseñado para utilizarlo con redes WDM-PON. A continuación se citarán y explicarán brevemente los componentes del diseño [19], [20]:

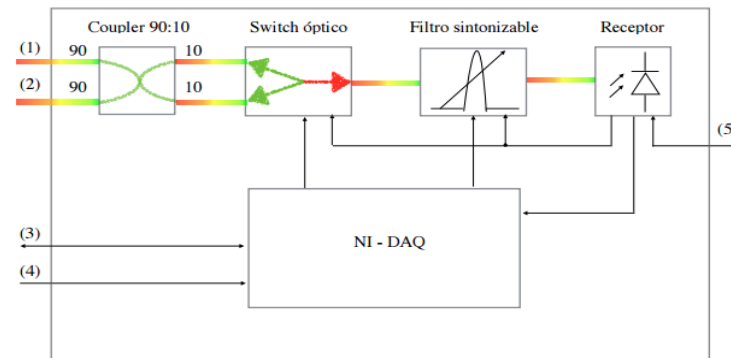


Figura 20: Diagrama de bloques del Analizador

Eric Borland, Josep Prat Goma, "Sistema de monitorización de redes ópticas de acceso con multiplexación en longitud de onda" Universitat Politècnica de Catalunya, páginas 25-68, Julio 2014.

- El acoplador (coupler) 90:10 es el primer elemento del analizador. Se utiliza para analizar el estado de la red de la forma más transparente posible. Es decir, para poder detectar si hay cortes en la red sin que los clientes sufran una elevada reducción de potencia (velocidad) en sus terminales. Precisamente por esta razón el ratio del acoplador es 90:10. También, gracias al acoplador combinado con el *switch* óptico el analizador es capaz de capturar ambos espectros, el de subida y el de bajada con tan solo un *click*.
- El *switch* óptico se utiliza exclusivamente para poder realizar la captura de uno u otro espectro (subida o bajada). Este selector se controla con la tarjeta DAQ y se activa con la señal del receptor.
- El filtro es el componente principal del Analizador. El filtro es controlado por la tarjeta DAQ y es el encargado de seleccionar cada una de las longitudes de onda. Gracias a ello, el Analizador es capaz de obtener el espectro en todo el rango (1535 nm a 1565 nm).
- En el receptor se utiliza un APD o fotodiodo de avalancha para poder obtener el margen dinámico necesario. Como se puede ver en el esquema eléctrico del producto, el APD es precedido de un divisor de tensión con el objetivo de alimentar el fotodiodo



a una tensión próxima a la de ruptura para poder obtener suficiente factor  $M$  para obtener el margen dinámico deseado. La fotodetección de avalancha, sin embargo, introduce inestabilidades y ruido, y es por eso que, tras el APD, se ha incluido un filtro paso bajo a 100 Hz con el objetivo de reducir ese ruido. Finalmente antes de la salida principal del receptor se ha incluido también un seguidor de tensión que nos ofrece la posibilidad de conectar la tarjeta DAQ sin tener problemas de acoplamientos entre nuestro receptor y dicha tarjeta.

- Por último, uno de los componentes no realizados en la Universitat Politècnica De Catalunya, comprados directamente al fabricante *National Instruments*, es el adquisidor de datos DAQ que se comunica con el ordenador a través de la interfaz USB de la que esta tarjeta portátil dispone. Esta tarjeta es la responsable de medir los voltajes en ambas salidas del receptor, de sintonizar el filtro en cada una de las frecuencias y de alternar el interruptor/selector óptico para cada una de las señales (subida y bajada). Este DAQ no es programado, es decir, no incluye un microcontrolador que guarda el software del analizador, por lo que no es posible su utilización sin la ayuda externa de un ordenador. Todas las instrucciones y medidas realizadas por dicha tarjeta son enviadas o recibidas por el software que corre el ordenador que lo controla.

## 8.2. WDM-DOCTOR

Se trata de otro sistema comercializado por PROMAX. El diseño anterior tiene un problema: no es capaz de distinguir si el fallo se produce porque la ONU de dicho usuario ha dejado de funcionar correctamente, o si ha sido un fallo en la fibra. Por ello se propone el diseño de un OTDR sintonizable diseñado y fabricado por EXFO®. Con este producto, al estar utilizando un OTDR se utiliza una señal que introduce el mismo para medir la potencia de las reflexiones.

Un OTDR no sintonizable requiere que la fuente de luz utilizada sea de alta potencia y de ancho espectro para abarcar todas las longitudes de onda de las fibras y un gran alcance. En el diseño que nos ocupa el objetivo es que este OTDR sintonizable se sintonice a las diferentes longitudes de onda de los usuarios con una potencia y anchos suficientes. Es posible realizar un OTDR que cumpla estas funciones ya que las reflexiones son coherentes con la frecuencia de la señal que las ha generado [19], [20]. Los componentes utilizados son los siguientes:

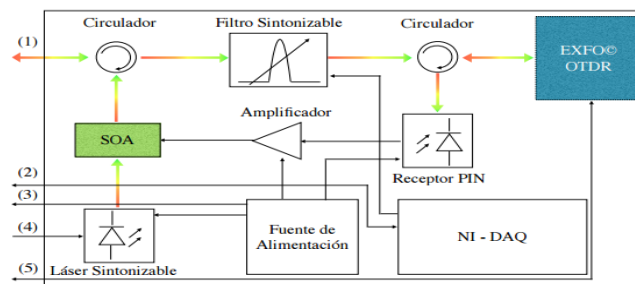


Figura 21: Diagrama de bloques del T-OTD



- El T-OTDR cuenta con dos circuladores, que son los encargados de hacer que la señal se envíe por un camino pero la reflexión llegue por otro.
- El filtro se utiliza para reducir el ruido de la reflexión y para estar seguros de medir, tan solo el canal deseado. Dicho filtro es parecido al del capítulo anterior utilizado para el analizador.
- El receptor que utiliza un fotodiodo PIN cuyas siglas indican su composición: una zona P y otra N, y una zona intrínseca I entre las dos capas P y N.
- Los SOA amplifican coherentemente la señal óptica de entrada, sin cambiarle la frecuencia y una alimentación eléctrica. Esto permite generar un pulso a la longitud de onda deseada y con el periodo exacto.
- El láser sintonizable, junto con el SOA son los encargados de generar el pulso del T-OTDR. El láser se sintoniza (utilizando las corrientes de acoplador, reflector y fase) a la longitud de onda que se desea testear y el SOA la amplifica.
- La fuente de alimentación se utiliza simplemente para alimentar eléctricamente los distintos componentes activos y cuenta con dos alimentaciones positivas (+24V y +8V) y masa.
- Por último el DAQ de National Instruments se controla con LabVIEW que ofrece ciertas alimentaciones gracias a sus salidas analógicas (como la del filtro de +5V) y el control de distintos dispositivos. Debería ser la encargada de sintonizar el filtro en una futura evolución del proyecto.

### 8.3. FIBERTEST de Agizer: Remote Fiber Testing System

Tal y como se expone en la página web oficial de Agizer, se trata de un sistema automático que tiene como objetivo monitorizar problemas potenciales que pueden aparecer en una red WDM-PON, reduciendo el tiempo necesario para detectar, localizar y corregir dichos errores. Las funciones de las que se encarga se pueden resumir en las siguientes [21]:

- Detección de subidas progresivas de atenuación, discontinuidad de reflexiones y variaciones en el coeficiente de reflexión.
- Proporcionar información en tiempo real sobre el estado físico de los enlaces ópticos.
- Identificar el estado de pre-falta de dispositivos y fibra óptica (detección del posible fallo antes de que se produzcan o afecten al servicio al que la red se dedica).
- La previsión de la propagación de fallos y de la degradación.
- La identificación de fallos y localizarlos.
- La automatización de las rutinas más típicas.
- Almacenamiento de las estadísticas y generación de informes del estado de la red.
- Detección de accesos no autorizados a la red.

Todas estas funciones pueden realizarse con total independencia por un operador, sin interferencia en la transmisión de datos. Además, el equipo se puede utilizar como un OTDR. Tiene la peculiaridad de poder ser utilizado por varios operadores simultáneamente en una red. El sistema se puede operar de forma remota e integrada en otros sistemas de gestión de red de las telecomunicaciones (RGT) o en sistemas de documentos de circulación.



En la figura 22 extraída de la web oficial de Agizer se indican algunos de los parámetros característicos.

OTDR	
Wavelength	1550, 1625 nm
for active fiber monitoring	1625 nm filtered
Dynamic range	up to 43 dB
Pulse width	6 - 20000 ns
Event dead zone (m)	up to 1 m
Attenuation dead zone (m)	up to 4 m
Splitter attenuation dead zone (m)	30 m
BASE UNIT	
Height	2U
Width	19" or 21"
Optical Commutator	built-in
Maximum Number of Optical Ports	48
Voltage of Station Supply, V	24,48,60

Figura 22: Parámetros característicos de FIBERTEST

Agizer, "Remote Fiber Testing System"

## Capítulo 9. Tablas Comparativas

## 9.1. Técnicas de Monitorización para la Detección Automática de fallos

A continuación se presenta una tabla comparativa de las diferentes técnicas de detección de fallos para redes de acceso ópticas pasivas que se describieron en los apartados anteriores. Se basa parcialmente en el estudio comparativo descrito en [10] pero ampliado en las técnicas y simplificando los parámetros que se utilizan.

Comparación de técnicas de monitorización automática																						
TDM-PON		OTDR		Centralizado	Automático	Transparencia	Demarcación	Single wavelength	Capacity	Detección de fallos	Localización de fallos	RN Activo	Coste	Fiabilidad	Complejidad	Escalabilidad	Cliente independiente	PSC en cascada	PON desplegada	Tiempo de notificación		
		Basado en OTDR		S	S	S	N	N	S	A	S	S	N	A	M	M	N	S	S	N	C	
		Billion OTDR		S	S	S	N	N	S	A	S	S	N	A	M	M	N	S	S	N	C	
		Embedded OTDR (compatible con WDM-PON)		N	S	N	N	D	A	S	S	S	N	M	B	A	S	N	N	N	M	
		Bypass		S	S	S	N	S	A	S	S	S	S	B	B	B	N	S	N	S	M	
		Active Bypass		S	S	S	N	S	A	S	S	S	S	B	B	B	N	S	N	S	M	
		Semi-Passive Bypass		S	S	S	N	S	A	S	S	S	S	B	B	B	N	S	N	S	M	
		Reference Reflector		S	S	S	S	S	A	S	S	N	N	B	B	B	N	S	S	S	C	
		Técnica basada en SRE		S	S	S	S	S	A	S	S	N	S	A	A	M	S	N	N	S	N	M
		SL-RSOA		N	S	S	N	RF	A	S	N	N	N	B	B	M	S	N	S	S	N	C
Reflective Signal		S	S	S	S	T	A	S	S	N	S	A	M	B	S	S	S	S	S	C		
		Chaotic Laser Subject to Optical Feedback	S	S	S	S	N	A	S	S	S	N	M	A	B	S	N	S	N	M		
		Técnica de monitorización de fallos con soporte para servicios móviles	S	S	S	S	N	A	S	S	S	S	B	A	M	S	S	S	S	M		
		Switchable Reflective Element	S	S	S	S	S	A	S	N	S	A	B	M	S	S	S	S	S	M		
		OFDR	S	S	S	S	S	A	S	S	N	B	M	B	S	S	S	S	S	C		
		Optical Coding	S	S	S	S	S	A	S	S	N	B	M	B	S	S	S	S	S	C		
		Solución basada en multiplexor DWDM	S	S	S	S	N	A	S	S	N	A	A	M	S	S	S	S	N	C		
		Solución basada en módulo de adaptación longitud de onda	S	S	S	S	S	A	S	S	S	A	A	M	S	S	S	S	S	M		
Generación de señal de luz en subida		Solución que utiliza transmisores LED de subida	S	S	S	S	N	A	S	S	S	N	A	A	M	S	N	N	N	C		
		Solución que utiliza transmisores VCSEL de subida	S	S	S	N	N	A	S	S	N	S	A	A	A	N	N	N	N	M		
		Auto-referencia de radiofrecuencia	S	S	S	S	N	A	S	S	N	B	A	A	M	S	N	N	S	M		
		Sistema de monitorización óptica preventiva con reflectores comunes	S	S	S	S	S	A	S	S	N	B	A	A	B	S	N	N	S	M		

S: Si N: No A: Alto B: Bajo M: Medio C: Corto L: Largo RF: Radio Frecuencia D: Datos

Tabla 2: Comparación entre técnicas de monitorización automática

La elección de una u otra técnica depende de las circunstancias, servicios, necesidades presupuestos, etc. A la hora de elegir cuál es la técnica adecuada, hay que tener en cuenta los compromisos que existen entre las características que se citan en la tabla 1.

Si queremos conseguir una técnica con gran capacidad, que localiza los fallos, con componentes activos en la RN, fiabilidad, bajo tiempo de notificación... supone tener altos costes. Además, normalmente la complejidad del método va relacionada con la capacidad para poder escalarlo.

Si no tenemos demasiado presupuesto y queremos utilizar una técnica para redes TDM-PON, es conveniente utilizar técnicas más económicas como las basadas en bypass u OTDRs. Estos métodos tienen como inconveniente que en ocasiones, se tienen que situar uno en cada rama, de forma que se incrementan los costes exponencialmente. En especial, se incrementan los costes en el caso del OTDR. Sin embargo, si tenemos que diseñar una red que soporte muchos usuarios o fibras ópticas de distribución, es recomendable utilizar técnicas de monitorización basadas en elementos reflectivos. Si bien, en estos casos, si los elementos reflectivos dependen de cada cliente, esto supone un aumento del tamaño y complejidad de inventario que hay que tener en cuenta. En caso de que necesitemos una técnica con capacidad de soporte para servicios móviles, la mejor opción es la última técnica desarrollada en el documento para redes TDM-PON.

Realizando el mismo razonamiento con las técnicas de monitorización dedicadas a redes WDM-PON, las más económicas son OFDR, la técnica basada en multiplexación óptica por división de código y las técnicas basadas por auto-referencia. En cuanto a la capacidad, las técnicas para redes WDM-PON desarrolladas en el documento son de alta capacidad y similares entre ellas. Si se necesitan técnicas que sean flexibles en cuanto a la sensibilidad y linealidad en el umbral de la detección de fallos, las más adecuadas son la técnica de auto-referencia por radiofrecuencia y la monitorización óptica preventiva con reflectores comunes. La segunda utiliza una única longitud de onda para todos los usuarios y no necesita modificaciones en el ODN minimizando el tamaño del inventario de usuarios, así que es más adecuado para redes desplegadas con un número alto de *splitters* y usuarios. Sin embargo, estos sistemas no se pueden utilizar en tiempo real. Para poder realizar la monitorización en tiempo real siendo transparente a cualquier formato y tasas de bits, es recomendable utilizar la técnica basada en la multiplexación óptica por división óptica.

## 9.2. Aplicaciones Comerciales

Comparación de productos comerciales	Automático	Transparencia	Demarcación	Single wavelength	Capacity	Detección de fallos	Localización de fallos	RN Activo	Coste	Fiabilidad	Complejidad	Escalabilidad	Cliente Independiente	PSC en cascada	PON desplegada	Tiempo de notificación
WDM-DOCTOR:HR-OSA	S	S	S	N	A	S	N	S	A	A	A	S	S	S	S	M
WDM-DOCTOR	S	S	S	N	A	S	S	S	A	A	A	S	S	S	S	M
FIBERTEST	S	S	S	N	A	S	S	S	A	A	A	S	S	S	S	B

S: Si N: No A: Alto B: Bajo M: Medio C: Corto L: Largo RF: Radio Frecuencia D: Datos

Tabla 3: Comparación entre productos comerciales



En la tabla 3 se caracterizan tres aplicaciones comerciales de las que se puede concluir lo siguiente:

La aplicación WDM-DOCTOR HR-OSA utiliza un analizador basado en un filtro sintonizable y un receptor óptico que nos permite conocer los fallos en la red con alta fiabilidad y con un tiempo de notificación razonable. Sin embargo el sistema es complejo y utiliza componentes activos. El mayor inconveniente de este sistema es que no es posible localizar el fallo. Por ello, WDM-DOCTOR se evoluciona para que sea posible localizar los fallos utilizando un OTDR sintonizable que necesita emitir una señal de ancho de banda suficiente para cubrir las longitudes de onda de todos los usuarios, y además se incrementa el coste y los tiempos de respuesta si la red es amplia.

El FIBERTEST de Agizer tiene capacidad de predicción de fallos, se puede usar por varios operadores simultáneamente, permite la recopilación de datos y estadísticas de fallos para su posterior análisis y la detección de accesos no autorizados a la red. El tiempo de notificación es menor que el de los anteriores.

Las tres aplicaciones mostradas en este documento, en general, son de un relativo alto coste, fiables, escalables, componentes pasivos y le otorgan independencia al cliente.

## Capítulo 10. Diseño de controlador para *switch* óptico

Para afrontar el caso de estudio en el que se basa este trabajo, es necesario realizar el diseño de una placa con un circuito que se encarga de controlar el *switch* óptico y regular las señales eléctricas que se le aplican mediante la tarjeta de adquisición DAQ controlada por el código desarrollado en Labview. El diseño ya había sido realizado por el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas de la Universidad Carlos III y lo aportado en este trabajo es el agujereado de la placa y la colocación adecuada de los componentes, las pruebas de comprobación de funcionamiento y la caracterización del *switch* óptico. Este *switch* óptico se utilizará posteriormente para simular y analizar la técnica de monitorización de auto-referencia por radiofrecuencia. En los siguientes apartados se desarrollarán más detalles sobre sus características y funcionamiento.

### 10.1. Descripción

Un *switch* óptico es un dispositivo que recibe luz por una de sus entradas y la encamina por una de sus salidas según las necesidades de la red óptica en la que se encuentra funcionando. La diferencia entre un conmutador óptico y un *switch* óptico es que mientras el conmutador se limita a permitir o impedir el paso de la luz, el *switch* la puede enviar por varios puertos. En concreto el *switch* que se tratará en este trabajo será un *switch* 1x2 con identificador OSW-22-135-09-1-N-S-FC/APC, es decir, tiene una entrada y dos salidas de luz. Utiliza fibra óptica monomodo con recubrimiento de plástico y cada puerto está formado por un conector FC/APC. El esquema principal que se utiliza para utilizar el *switch* óptico se puede observar en la figura 23.

Para controlar el *switch* óptico es necesario realizar el diseño de la placa para el que se utilizará un diseño iniciado anteriormente en otro trabajo. Este diseño nos permitirá manejar de manera automática o manual el encaminamiento de la luz en el *switch*. El esquema principal del sistema se puede observar en la figura 23.

El encaminamiento automático de la luz en el *switch* óptico se realiza mediante un desarrollo en Labview controlado por la tarjeta de adquisición DAQ, que nos permitirá introducir una señal de 5V (ON) o 0V (OFF) mediante un *switch* en el *Front Panel* de Labview, para que la luz salga por un puerto u otro. Si activamos el modo manual, el *switch* no se podrá controlar mediante la tarjeta de adquisición y la señal de 0 o 5 voltios se elegirá mediante el *switch* mecánico de la placa. El modo manual se puede utilizar para que el *switch* óptico conmute según pongamos el ON o el OFF en el segundo *switch* mecánico de la placa.

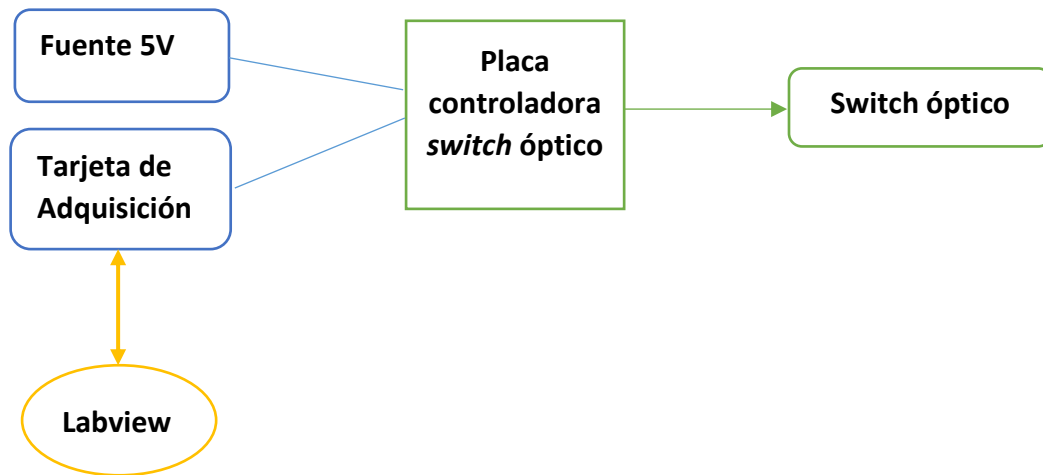


Figura 23: Esquema principal del sistema para controlar el *switch* óptico

## 10.2. Funcionamiento y esquemáticos

El esquemático del controlador para el *switch* óptico que ya estaba diseñado con anterioridad a este trabajo, se puede observar en la figura 24. La parte superior del circuito se encarga de seleccionar el modo en el que trabajará el *switch* mediante dos conmutadores que se pueden observar en el esquemático. El primero determina si el encaminamiento del *switch* óptico se realiza manualmente o automáticamente. Si se coloca en posición manual, el segundo *switch* determina si el sistema manual está ON u OFF. Si el primer *switch* se coloca en posición automática el relé entra en funcionamiento enrutando el *switch* óptico según la posición del *switch* ON/OFF del *Front Panel* del desarrollo en Labview.

En la parte inferior de la figura 24, aparece una fuente de 5 voltios que simula la tarjeta de adquisición DAQ que utilizaremos para comunicar nuestro circuito con Labview, con el cual se introducirán señales eléctricas de 0 y 5 voltios para conseguir que el *switch* óptico conmute a uno u otro puerto de salida. Esta parte del circuito está formada por un regulador LM317<sup>1</sup> que mantiene la tensión lo suficientemente estable cuando aumenta o disminuye la carga. Para ello se configura el regulador en modo *Protection Diodes* que aparece en el *datasheet* del regulador LM317, que se junta en el Anexo III. Con este modo se consigue que los condensadores que se utilizan para evitar el rizado de la señal, no se descarguen demasiado rápido cuando la corriente de entrada es demasiado baja. La corriente que circula por el puerto ADJ del regulador y la tensión de salida se relacionan mediante la siguiente fórmula:

$$V_{out} = 1.25V \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + (I_{ADJ} \times R_2)$$

A continuación, como se puede observar, se conecta un transistor para obtener mayor corriente a la hora de alimentar el relé ya que la tarjeta de adquisición genera hasta 5mA y el relé necesita 20mA de corriente para su funcionamiento. Se eligieron R1 y R2 para tener una suficiente corriente en la base del transistor.

<sup>1</sup> En la figura 24 aparece un regulador LM117 porque las librerías en Orcad no contenían el regulador LM317



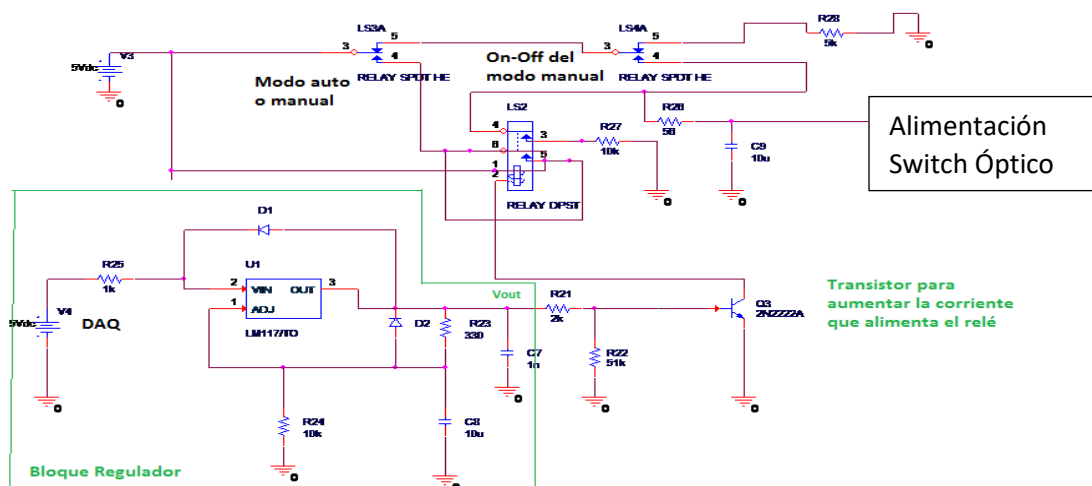


Figura 24: Esquemático del controlador del switch óptico

### 10.3. Pruebas

Una vez realizado el diseño, es necesario realizar pruebas y comprobaciones con las que nos aseguremos el funcionamiento eléctrico de la placa controladora del *switch* y si este ejerce las funciones necesarias sobre el *switch* óptico, es decir, si el *switch* cambia de salida y ambos modos funcionan.

#### 10.3.1. Soldadura y pruebas de la placa

El primer paso es medir con el voltímetro, la continuidad en los puntos de soldadura de la placa para comprobar su buen estado, y medir la tensión y la corriente en puntos clave del circuito de la placa. Estas medidas se pueden observar en la tabla 4. Con los resultados de esta tabla podemos concluir que el relé se alimenta con corriente suficiente y que los valores de las tensiones son bastante lógicos.

Componente	Tensión
$V_{in}$ del LM317	3,58 V
$V_{out}$ del LM317	3,19 V
R(51k)	750mV
Emisor 2N2222A	1,4mV
Colector 2N2222A	35,1mV
Interruptor LS3A	5,076V
Pin 12 (alimentación del <i>switch</i> óptico ON)	4,841 V
Pin 12 (alimentación del <i>switch</i> óptico OFF)	0,5 mV
Componente	Corriente
Base del transistor 2N2222A	2,2 mA
Colector del transistor 2N2222A	26,55mA

Tabla 4: Medidas en la placa controladora del switch óptico

La siguiente prueba trata de introducir una señal continua de 5 voltios configurando el *VoltageOut* del *AnalogOut* (figura 25) de la tarjeta de adquisición para comprobar si el zócalo que soporta el *switch* óptico en la placa, cambia de posición. Para ello, se conecta la alimentación correspondiente a la tarjeta de adquisición en los puertos ao0 y GND de la misma. Se elige una salida *AnalogOut* porque podemos obtener una corriente de 5mA que es mayor que la que obtenemos con una salida digital *DigitalOut* que es de 0.6mA.

Para ello es necesario alternar esta señal con otra señal continua de 0 voltios. Para cada señal se comprueba si el zócalo que sostiene el *switch* realiza un sonido que indica que éste funciona.

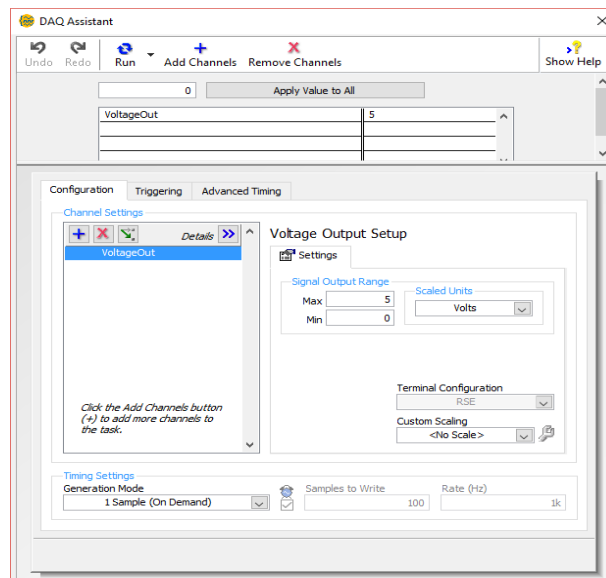


Figura 25: Ventana de configuración del *AnalogOut* en Labview

A continuación, se conecta el *switch* óptico a la placa mediante el zócalo y se comprueba si el *switch* cumple la lógica de control que aparece en su hoja técnica, conectando los pines de control a la entrada *AnalogIn* de la tarjeta de adquisición para utilizar el desarrollo en Labview. Es necesario comprobar que se activan los pines de monitorización correspondientes en estado ON (5V en la tarjeta de adquisición) y OFF (0V en la tarjeta de adquisición) mediante los botones indicadores en Labview.

Los resultados obtenidos son coherentes con el contenido del *datasheet* del *switch* óptico que se observa en las figuras 26 y 27. En modo automático, la lógica de control activa los pines 10-8 y 3-5 con el *switch* en estado OFF y los pines 3-6 y 10-7 en estado ON. Por tanto, la lógica de control funciona correctamente, pero está invertida al funcionamiento que se detalla en el *datasheet*. Esto quiere decir que el funcionamiento del *switch* en estado ON, será igual al funcionamiento que se explica en el *datasheet* en estado OFF, y viceversa. Como se puede observar en la figura 27, el *Front Panel* del desarrollo en Labview contiene indicadores de los pines activos o inactivos además del *switch* ON/OFF con el que se selecciona el valor de entrada del DAQ (5V-ON, 0V-OFF), un controlador para detener el proceso y un indicador que indica si existe algún error en la lógica de control. En el modo manual, en lugar de utilizar el botón de Labview *switch* ON/OFF se usa el segundo *switch* de la placa para ponerlo en modo ON y OFF, cumpliendo la misma lógica de pines que en el modo automático. En el Anexo II se muestran imágenes en las que se observan las distintas ventanas de Labview y entre ellas el *Front Panel* según el estado del *switch* en Labview.

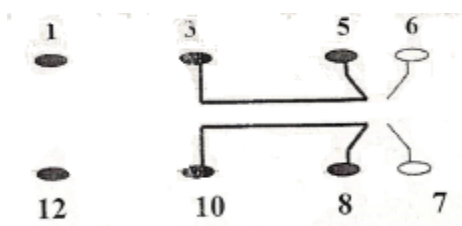


Figura 26: Lógica de control del switch óptico modo ON

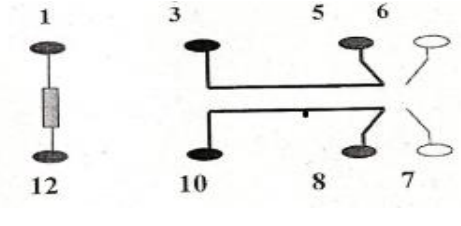


Figura 27: Lógica de control del switch óptico modo OFF

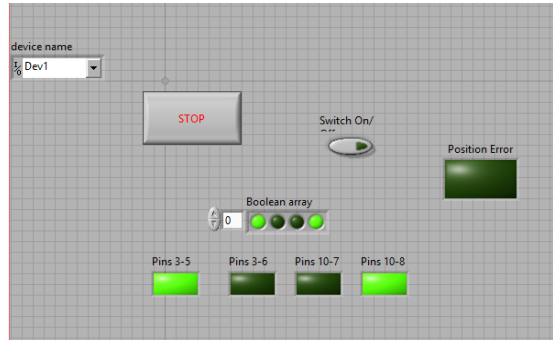


Figura 28: Front Panel del desarrollo en Labview

### 10.3.2. Pruebas ópticas

Las pruebas ópticas que se realizan serán las siguientes: en primer lugar se conecta el *switch* en el zócalo de la placa aplicando al circuito la señal de 0 y 5 voltios mediante la tarjeta de adquisición para comprobar si el *switch* realiza el cambio de puerto de salida, y en segundo lugar se caracterizará el *switch* óptico.

Para realizar la primera prueba se conecta el *switch* óptico a la placa y a su vez esta se conecta a la tarjeta de adquisición para controlarla mediante Labview. Mediante el primer *switch* de la placa seleccionamos el modo automático o manual para poder introducir las señales de 0 y 5 voltios, cambiando el estado del *switch* que aparece en la figura 28 en Labview o el segundo *switch* mecánico de la placa. Además, conectamos la entrada del *switch* óptico a un láser óptico SOF-131-C que nos proporciona una potencia óptica de 0.53 dBm con una longitud de onda de 1310 nm en la entrada del *switch* óptico (puerto 1) y medimos la potencia óptica de salida por los puertos 2 y 3 en los estados ON y OFF del *switch* de Labview, o de la placa según el modo que esté activado. En la figura 29 aparece el símbolo del *switch* óptico y como se distribuyen sus puertos de entrada y salida.

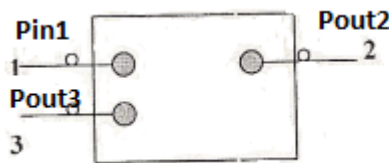


Figura 29: Símbolo y distribución de los puertos del switch óptico

Los resultados obtenidos se encuentran en la siguiente tabla:

OPTICAL SWITCH 335 1X2						
AUTOMÁTICO			MANUAL			
Salida 2	0 V	- 1,3dBm	ON	Salida 2	0 V	No hay luz
	5 V	No hay luz			5 V	No hay luz
Salida 3	0 V	No hay luz		Salida 3	0 V	- 1,3dBm
	5 V	- 1,3dBm			5 V	- 1,3dBm
			OFF	Salida 2	0 V	- 1,3dBm
					5 V	- 1,3dBm
				Salida 3	0 V	No hay luz
					5 V	No hay luz

Tabla 5: Valores de comprobación de encaminamiento de la luz en el *switch* óptico a 1310 nm

Con lo mostrado en la tabla 5, podemos concluir con el modo automático activado, que con el *switch* ON/OFF en Labview en modo ON la luz se encamina por el puerto 3 y cuando está en OFF por el puerto 2. Además en el modo manual, cuando el *switch* de la placa se pone en OFF la luz se encamina por el puerto 3 y si está en modo ON por el puerto 2. Con estas comprobaciones se demuestra que el *switch* óptico cambia de ruta correctamente.

La segunda parte trata de caracterizar el *switch* óptico. Para ello se calculan las pérdidas de inserción, retorno, *crosstalk* y el tiempo de respuesta. Para conseguir estos cálculos se utilizan uno de los módulos del sistema Agilent 8164B Light Measurement System como fuente de luz y el medidor de potencia óptica EXFO PM-1100 para calcular las potencias recibidas por cada puerto. Se tomarán estas medidas para diferentes longitudes de onda que se utilizarán en el enlace ascendente de la red WDM-PON, que utiliza la técnica de monitorización que trataremos posteriormente en este trabajo. Las longitudes de onda serán 1472 nm, 1547.71 nm y 1577 nm. Las fórmulas<sup>2</sup> para calcular las pérdidas son las siguientes:

$$Lins_j = -10 \times \log \frac{Pin1}{Poutj} \quad j = 2, 3 \text{ puertos de salida}$$

$$Lret1 = -10 \times \log \frac{Pin1}{Pout1}$$

$$Crosstalk_j = -10 \times \log \frac{Pin1}{Poutj}$$

Para calcular las pérdidas de retorno utilizaremos un circulador óptico CIR-3-22-10-FA con fibra óptica y conectores FC/APC para obtener el valor de la potencia que se refleja por el puerto de entrada 1 del *switch* óptico. En el esquema de la figura 30 se conecta una fuente de luz de 6 dBm utilizada mediante uno de los módulos del sistema Agilent 8164B Light Measurement System en el puerto 1 y se acopla el puerto 2 del circulador óptico con la entrada del *switch* óptico (puerto 1 del *switch*). De esta manera medimos la potencia

<sup>2</sup> Números de las fórmulas referidos a los puertos del *switch* óptico

óptica que llega por el puerto 3, obteniendo así la potencia que se refleja en el puerto 1 del *switch* cuando se introduce luz por el mismo.

Plantearemos el circulador con el siguiente esquema:

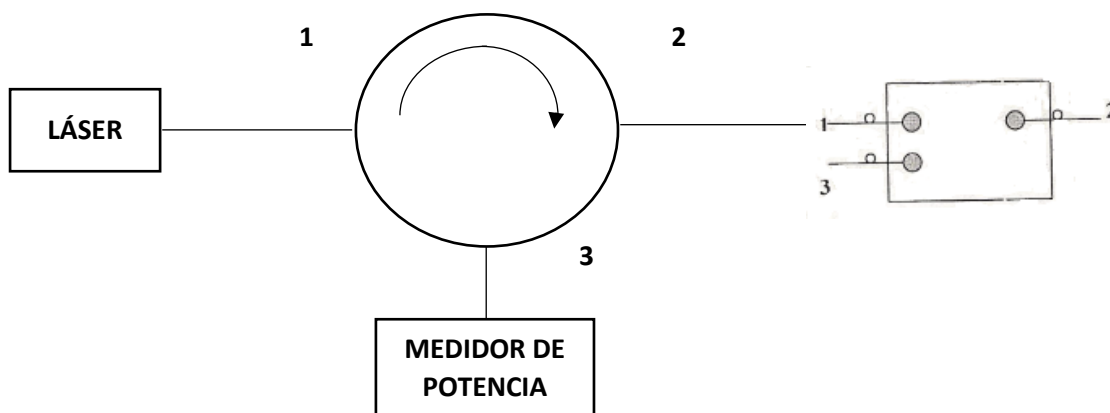


Figura 30: Esquema de la utilización del circulador óptico para medir la potencia en el puerto de entrada del *switch* óptico

### Caracterización del circulador óptico

Con los valores de las tablas 6,7 y 8<sup>3</sup> se averigua el funcionamiento del circulador óptico. Se puede insertar luz por el puerto 1 y 2 para obtener potencia óptica a la salida de alguno de los otros puertos. Cuando se inyecta luz por el puerto 1, la luz se encamina hacia el puerto 2 y la luz que sale por el puerto 3 tiene una potencia muy baja. Sin embargo, si inyectamos luz por el puerto 2 la luz se encamina por el puerto 3 y la potencia que llega al puerto 1 es muy baja. El circulador no funciona correctamente si inyectamos luz por el puerto 3, ya que no sale luz con potencia significativa por ningún puerto.

Se puede comprobar que las pérdidas de inserción disminuyen y que por tanto la potencia óptica en los puertos de salida es mayor, a medida que se aumenta la longitud de onda. El camino más eficiente del circulador es por el cual se inyecta la luz por el puerto 1 y sale por el puerto 2.

Las pérdidas de inserción calculadas son mayores que las teóricas que aparecen en el *datasheet*. Los valores teóricos están en torno a 0.7 dB. Esto puede ser debido al mal estado y deterioro de las fibras ópticas y conectores ópticos.

$\lambda=1472$ nm				
<b>Pin1</b>	<b>Pout2</b>	4.34 dBm --> 2.71 mW	<b>Lins2</b>	1.7 dB
6 dBm	<b>Pout3</b>	-51.5 dBm	<b>Lins3</b>	57.5 dB
<b>Pin2</b>	<b>Pout1</b>	-55.4 dBm	<b>Lins1</b>	61.4 dB
6 dBm	<b>Pout3</b>	1.91 dBm --> 1.55 mW	<b>Lins3</b>	4.08 dB
<b>Pin3</b>	<b>Pout1</b>	-65.1 dBm	<b>Lins1</b>	71.1 dB
6 dBm	<b>Pout2</b>	-36,3 dBm	<b>Lins2</b>	42.3 dB

Tabla 6: Valores de la caracterización del circulador óptico medidos con longitud de onda 1472 nm

<sup>3</sup> Los números que aparecen en las tablas se refieren a los puertos del circulador

$\lambda=1547,71 \text{ nm}$				
<b>Pin1</b>	<b>Pout2</b>	4.47 dBm --> 2.8 mW	<b>Lins2</b>	1.52 dB
6 dBm	<b>Pout3</b>	-49.8 dBm	<b>Lins3</b>	55.8 dB
<b>Pin2</b>	<b>Pout1</b>	-54.8 dBm	<b>Lins1</b>	60.8 dB
6 dBm	<b>Pout3</b>	2.45 dBm --> 1.75 mW	<b>Lins3</b>	3.56 dB
<b>Pin3</b>	<b>Pout1</b>	-65.7 dBm	<b>Lins1</b>	71.7 dB
6 dBm	<b>Pout2</b>	-58,3 dBm	<b>Lins2</b>	64.3 dB

Tabla 7: Valores de la caracterización del circulador óptico medidos con longitud de onda 1547,1 nm

$\lambda=1577 \text{ nm}$				
<b>Pin1</b>	<b>Pout2</b>	4.83 dBm --> 3.04 mW	<b>Lins2</b>	1.17 dB
6 dBm	<b>Pout3</b>	-47.12 dBm	<b>Lins3</b>	53.11 dB
<b>Pin2</b>	<b>Pout1</b>	-45.96 dBm	<b>Lins1</b>	51.95 dB
6 dBm	<b>Pout3</b>	2.82 dBm --> 1.91 mW	<b>Lins3</b>	3.19 dB
<b>Pin3</b>	<b>Pout1</b>	-72 dBm	<b>Lins1</b>	78 dB
6 dBm	<b>Pout2</b>	-53,15 dBm	<b>Lins2</b>	58.14 dB

Tabla 8: Valores de la caracterización del circulador óptico medidos con longitud de onda 1577 nm

### Caracterización del *switch* óptico

El último paso para caracterizar el *switch* óptico trata de medir los valores obtenidos en el medidor de potencia óptica eliminando el circulador del esquema. Para conseguir estos cálculos se utilizan uno de los módulos del sistema Agilent 8164B Light Measurement System como fuente de luz y el medidor de potencia óptica EXFO PM-1100. Los valores de potencia obtenidos en los diferentes puertos y los valores de las pérdidas calculados a partir de ellos, se muestran en las tablas 9,10 y 11<sup>4</sup>. La fuente de luz se acopla por el puerto 1 del *switch* óptico. En la figura 31 se muestra como es necesario seleccionar el puerto 2 o 3 según el que queramos medir:

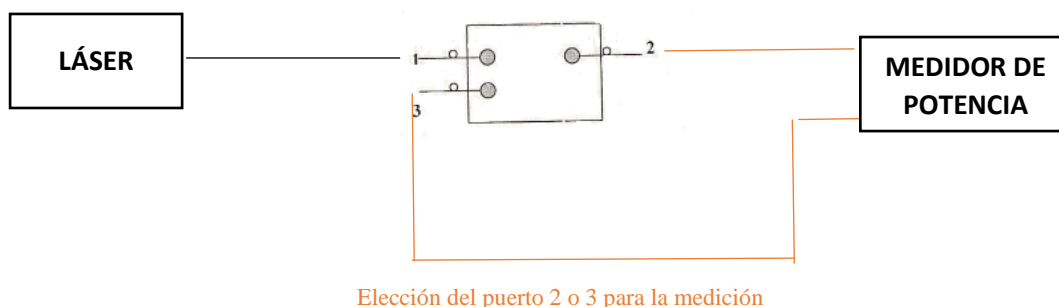


Figura 31: Esquema de medición de potencia óptica para la caracterización del *switch* óptico

Al igual que sucede en el caso del circulador, la potencia óptica recibida aumenta ligeramente en los puertos de salida conforme crece el valor de la longitud de onda y por

<sup>4</sup> Los número de los puertos que aparecen en la tabla se refieren a los puertos del switch óptico

tanto las pérdidas de inserción disminuyen proporcionalmente. Las pérdidas de inserción en ambos puertos son mayores que las teóricas mostradas en el *datasheet*, las cuales son del orden de 0.5 dB. Esto puede ser debido al deterioro de las fibras ópticas y los conectores del *switch* óptico.

Con respecto a las pérdidas *crosstalk*, estas son difíciles de medir ya que la potencia reflejada por los puertos es muy pequeña y por tanto en ocasiones el medidor de potencia ni siquiera es capaz de representar un valor exacto porque en la práctica está midiendo ruido óptico. Sin embargo, aunque no obtengamos valores muy precisos se puede concluir que las pérdidas *crosstalk* son muy altas y en consecuencia las potencias reflejadas en los puertos 2 y 3 son muy bajas. Además las pérdidas *crosstalk* tienden a ser mayores conforme aumenta el valor de la longitud de onda. El *datasheet* marca estas pérdidas en valores mayores de 65 dB y por tanto las medidas cumplen con este requisito.

En cuanto a las pérdidas de retorno, se obtienen dos valores distintos según el estado ON/OFF del *switch* correspondiente en los modos automático o manual. Para obtener los valores reales de las pérdidas de retorno es necesario tener en cuenta las pérdidas de inserción del circulador:

$$Lret1_{ON} = Lret1_{ON}'^5 - Lins_{1,2}^6 - Lins_{2,3}^6$$

$$Lret1_{OFF} = Lret1_{OFF}'^5 - Lins_{1,2}^6 - Lins_{2,3}^6$$

Los valores de las pérdidas de inserción del circulador óptico que son necesarios para el cálculo de las pérdidas de retorno se citan en la figura 32:

	$\lambda=1472$ nm	$\lambda=1547,71$ nm	$\lambda=1577$ nm
$Lins_{1,2}$	1.7 dB	1.52 dB	1.17 dB
$Lins_{2,3}$	4.08 dB	3.56 dB	3.19 dB

Figura 32: Valores utilizados de las pérdidas de inserción del circulador óptico

El valor obtenido mediante el medidor óptico y el calculado posteriormente teniendo en cuenta las pérdidas de inserción del circulador óptico aparecen en las tablas 9, 10 y 11. Los dos valores obtenidos son muy bajos y esto significa que se refleja muy poca potencia óptica hacia el puerto 1 cuando por el mismo se inyecta luz. Las pérdidas de retorno teóricas están por encima de 50 dB según el *datasheet* del *switch* óptico y como se puede comprobar las medidas tomadas cumplen con esos valores teóricos.

<sup>5</sup> Valor obtenido con el medidor de potencia óptica

<sup>6</sup>  $Lins_{a,b}$  a: puerto de entrada b:puerto de salida (referidos al circulador)



$\lambda=1472$ nm					
ESTADO DEL SWITCH	Pin1 = 6 dBm --> 3.98 mW				
OFF	Pout3	-71.2 dBm		Lins2	1.733 dB
OFF	Pout2	4.27 dBm --> 2.67 mW		Lins3	1.669 dB
OFF	Pout1	-54 dBm		Cross2	76 dB
ON	Pout3	4.33 dBm --> 2.71 mW		Cross3	77,2 dB
ON	Pout2	-70 dBm		Lret1ON'	49.3 dB
ON	Pout1	-45.8 dBm		Lret1OFF'	60 dB
				Lret1ON	43.52 dB
				Lret1OFF	54.22 dB

Tabla 9: Valores de la caracterización del *switch* óptico medidos con longitud de onda 1472 nm

$\lambda=1547,71$ nm					
ESTADO DEL SWITCH	Pin1 = 6 dBm --> 3.98 mW				
OFF	Pout3	-72 dBm		Lins2	1.733 dB
OFF	Pout2	4.28 dBm --> 2.67 mW		Lins3	1.589 dB
OFF	Pout1	-54 dBm		Cross2	valor alto
ON	Pout3	4.29 dBm --> 2.76 mW		Cross3	78 dB
ON	Pout2	$\approx 0$ mW		Lret1ON'	49.18 dB
ON	Pout1	-43.2 dBm		Lret1OFF'	60 dB
				Lret1ON	44.1 dB
				Lret1OFF	54.92 dB

Tabla 10: Valores de la caracterización del *switch* óptico medidos con longitud de onda 1547,1 nm

$\lambda=1577$ nm					
ESTADO DEL SWITCH	Pin1 = 6 dBm --> 3.98 mW				
OFF	Pout3	-66.1 dBm		Lins2	1.6 dB
OFF	Pout2	4.4 dBm --> 2.75 mW		Lins3	1.542 dB
OFF	Pout1	-54 dBm		Cross2	94 dB
ON	Pout3	4.46 dBm --> 2.79 mW		Cross3	72.1 dB
ON	Pout2	$\approx 88$ dBm		Lret1ON'	49.6 dB
ON	Pout1	-43.6 dBm		Lret1OFF'	60 dB
				Lret1ON	45.24 dB
				Lret1OFF	55.64 dB

Tabla 11: Valores de la caracterización del *switch* óptico medidos con longitud de onda 1577 nm

### Medida del tiempo de respuesta del *switch* óptico

El último paso en las pruebas ópticas del *switch*, es medir el tiempo que tarda en cambiar de puerto por el que se encamina la luz. Se trata de una medida de alta importancia en sistemas o aplicaciones de alta velocidad que necesitan que los retardos sean bajos. Para utilizar el *switch* óptico en aplicaciones de este tipo se usa el modo automático y por tanto será en este modo en el que se realicen las medidas. En el modo manual el valor del tiempo de respuesta sería más alto debido a las pérdidas del *switch* ON/OFF mecánico de la placa.



El método trata de calcular la diferencia temporal entre el momento en el que el *AnalogOut* varía el valor de la señal a 0 o 5 voltios o viceversa, y el momento en el que toda la potencia óptica se transmite por el puerto al que el *switch* ha conmutado. Para ello se utiliza el siguiente esquema:

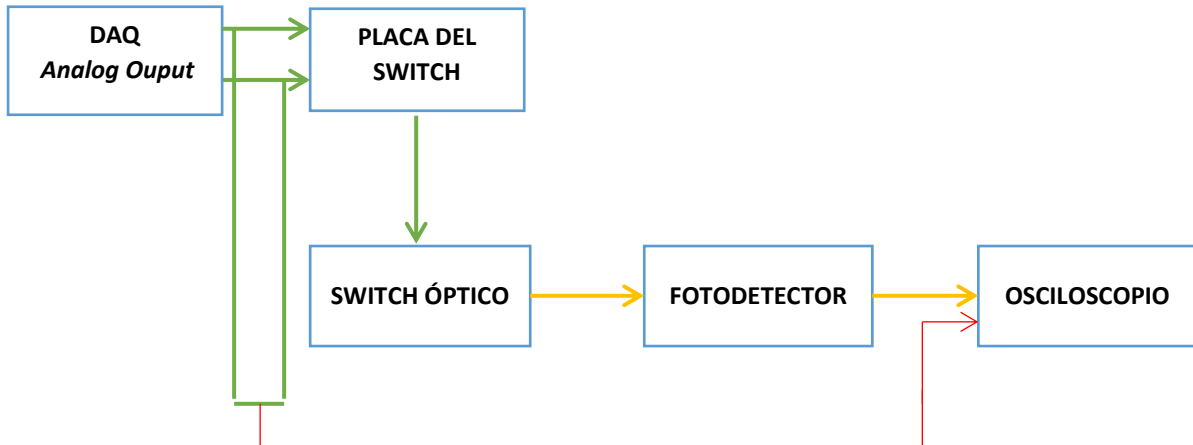


Figura 33: Esquema de sistema para medir el tiempo de respuesta del *switch* óptico  
Verde: Enlace eléctrico Rojo: Enlace BNC Amarillo: Enlace óptico

Para el funcionamiento del sistema de la figura 33, el primer paso es sacar por el canal 1 del osciloscopio la señal del *AnalogOut* del DAQ. Para ello, utilizamos un cable con dos cocodrilos en un extremo y en el otro un conector BNC para el osciloscopio. Una vez que vemos esta señal en el osciloscopio, nos queda sacar por el canal 2 la señal a la salida del *switch* óptico. Para ello se utiliza un fotodetector en avalancha APD110C de THORLABS. Este fotodetector se encarga de transformar la señal óptica que le llega, a una señal eléctrica con valores de tensión dependientes con la potencia óptica que hay a la entrada del fotodetector.

En el momento que ya se observan las dos señales en la pantalla del osciloscopio, el siguiente paso es configurar el *trigger* del osciloscopio. Es necesario utilizar el *trigger* para poder observar las dos señales en el momento en el que conmuta el *switch* óptico. El *trigger* se configura en modo normal con un nivel de 1 voltio para el canal 1 y con la detección activada en bajada. De esta forma cuando cambiemos el estado del *switch* de ON a OFF en Labview la señal del *AnalogOut* del DAQ superará el nivel del *trigger*, de forma que las dos señales se pararán en el osciloscopio y podremos realizar las medidas.

Para que las medidas que se realicen sean precisas, se optará por realizar 5 medidas diferentes para medir la repetibilidad de los resultados. Además para medir la diferencia de tiempo entre una señal y otra, se cogerá el 50% de la pendiente del tiempo de bajada o subida en cada una de las señales. Para ello, se medirán varios valores máximos y mínimos de cada señal antes de que se produzca la bajada para que el cálculo sea más preciso. Después, se calculará el punto intermedio entre las medias de los valores mínimos y máximos obtenidos. Para dicho valor, en cada señal se colocarán sendos cursores y se medirá la diferencia temporal. En las figuras 34,35 y 36 se pueden observar las dos señales

paradas después de la detección del *trigger* y la colocación de los cursores en el proceso de medida respectivamente.



Figura 34: Señales del Analog Out del DAQ y de la salida del *switch* óptico en el momento de la conmutación



Figura 35: Colocación del cursor en la señal del *Analog Out* del DAQ en el canal 1 para el cálculo del tiempo de respuesta del *switch* óptico



Figura 36: Colocación del cursor en la señal de salida del fotodetector correspondiente al *switch* óptico en el canal 2 para el cálculo del tiempo de respuesta del *switch* óptico



Para analizar los resultados de las cinco medidas tomadas, se recogerán el valor máximo y mínimo de los tiempos de respuesta, y se calculará la media y desviación típica de dichos valores. Los resultados y los cálculos mencionados se muestran en la tabla 12.

Valores medidos	Valor máximo	Valor mínimo	Media	Varianza	Desviación típica
11,1 ms	11,52 ms	11,1 ms	11,339 ms	0,1029 ms <sup>2</sup>	0,3207 ms
11,44 ms					
11,52 ms					
11,35 ms					
11,287 ms					

Tabla 12: Resultados de las medidas del tiempo de respuesta del *switch* óptico

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de la varianza y la desviación típica son las siguientes:

$$\text{Varianza} \rightarrow \sigma^2 = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$$

$$\text{Desviación típica} \rightarrow \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

$x_i \equiv$  valor medido

$\mu \equiv$  media

Observando los resultados podemos concluir que la precisión de las medidas es bastante alta ya que la diferencia entre el mínimo y el máximo es de 0.41 ms el cual no es un valor demasiado alto. Además midiendo la desviación típica podemos estudiar como varía el valor del tiempo de respuesta con respecto a la media. Se puede calcular realizando la raíz cuadrada de la varianza. La desviación típica es bastante baja con un valor de 0.3207 ms. El tiempo de respuesta del *switch* tiene un valor medio de 11.339 ms, que es aceptable teniendo en cuenta la antigüedad de este dispositivo y su posible deterioro.

## Capítulo 11. Caso de Estudio: Simulación de la técnica óptica preventiva con reflectores comunes

Este caso de estudio consistirá en la simulación de la técnica de monitorización de fallos óptica preventiva con reflectores comunes, evolucionada a partir de la técnica de auto-referencia por radiofrecuencia sobre una red WDM-PON mediante los equipos del Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas del Departamento de Tecnología Electrónica.

### 11.1. Herramientas de la simulación

Con el objetivo de realizar la simulación en una red WDM-PON que nos sirva para analizar el comportamiento de la técnica, se utilizará el programa Virtual Photonics Instrumentation (VPI). Para ello utilizaremos las herramientas VPItransmissionmaker y VPIcomponentMaker que contiene esta aplicación, y que nos permitirá obtener los elementos necesarios para construir la red y configurar la simulación [22].

VPI permite realizar simulaciones de sistemas fotónicos avanzados, representando desde escenarios de red complejos hasta componentes concretos. Las simulaciones se pueden realizar con modelos ya existentes en la herramienta o bien diseñados por el usuario. Todos los sistemas simulados pueden ser personalizados variando los parámetros de simulación generales como la tasa binaria de simulación o la frecuencia central a la que se trabaja, y los parámetros específicos de cada uno de los elementos que integran la simulación. Otra forma de personalizar la simulación es diseñar los componentes que forman la simulación. Se pueden desarrollar dispositivos diseñados por el usuario, simulando la estructura física del componente o a través de su función de transferencia.

La modularidad es otra de las características de VPI, ya que tiene la capacidad de incluir componentes o incluso sistemas complejos como un bloque, facilitando así la interconexión entre los elementos. Integrando varios elementos en un bloque, podemos modificar sus parámetros sin tener que modificarlos por separado en cada elemento. Ésta característica también puede ser empleada con los dispositivos creados por el usuario, indicando los parámetros que se desea que sean dinámicos al generar el bloque.

### 11.2. Localizaciones posibles para la aplicación del *switch* óptico en una red WDM-PON

Se plantean tres escenarios posibles de utilización del *switch* óptico dentro de la red WDM-PON que se va a monitorizar:

- Utilizándolo como separación de dos ODNs en la técnica evolucionada preventiva con reflectores comunes.
- Aplicándolo a la misma técnica de monitorización, para separar las señales de datos y monitorización.
- Usándolo como un elemento con capacidad de cambiar de posición que sirve como herramienta para medir las pérdidas en las posiciones deseadas en la red.

En el caso de este proyecto se trabajará con el *switch* óptico separando dos ODNs. Por ello, en la simulación colocaremos el *switch* óptico justo antes de la fibra de alimentación. De esta manera, el *switch* tiene la capacidad de separar dos redes ópticas distintas a las que los OLTs dan servicio.

### 11.3. Escenarios en la simulación de la técnica de monitorización

El objetivo es el diseño de una red WDM-PON con la que se consiga simular la técnica de monitorización. La arquitectura o estructura de la técnica, se puede observar en la figura 19 del apartado 7.10 donde se explica dicha técnica. En este trabajo solamente se estudiará el funcionamiento de la técnica de monitorización óptica preventiva con reflectores comunes en el enlace descendente, es decir desde las OLTs hasta las ONUs. Además, aunque se configurará el sistema de tal forma que podamos transmitir las señales necesarias para las posteriores medidas de las fases para la auto-referencia, en la simulación no se realizarán los cálculos de los que se encarga el OMM para la detección de errores en la red óptica. La transmisión bidireccional en el sistema y la parte electrónica del OMM quedan abiertas para un trabajo posterior.

Para la realización de la simulación hay que basarse en los parámetros utilizados en la validación experimental que aparece en el documento, donde se desarrolla la técnica de monitorización [18]. Como se indica en este artículo, para realizar las medidas de potencia y de BER se utilizan dos escenarios distintos.

#### 11.3.1. Escenario red clásica WDM-PON

El primero de ellos, es una red WDM-PON clásica en la que no se incluyen los elementos para monitorizar la red, como se muestra en la figura 37.

Ambos escenarios se basan en los parámetros que aparecen en [18]. Los principales parámetros que se tienen en cuenta son la tasa de bits de 12.5 Gbits/s, un PBRs de orden 30 (valor máximo en VPI) en el generador de bits, una fibra de alimentación de 15 km de longitud y fibras de distribución de 1 km, y con una atenuación de 0.2 dB/km en todas las fibras.

También se utilizarán dos fuentes de láser (*Laser Pulsed* en VPI) para simular dos OLTs que transmiten datos con longitudes de onda 1588.84 nm y 1589.65 nm con una anchura espectral de 0.21 nm. Estas longitudes de onda se corresponden con el puerto 19 y 20 del AWG respectivamente, que se utiliza para el desarrollo de esta técnica en el laboratorio del Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas del Departamento de Tecnología Electrónica. Estas longitudes de onda cumplen con los requisitos del estándar G.698.3 [23] de la ITU (Anexo IV) en enlace descendente. Estas señales ocupan las banda L del espectro (figura 38). Las señales de datos se modulan mediante una fuente de bits y un *driver* con un modelo Gaussiano.

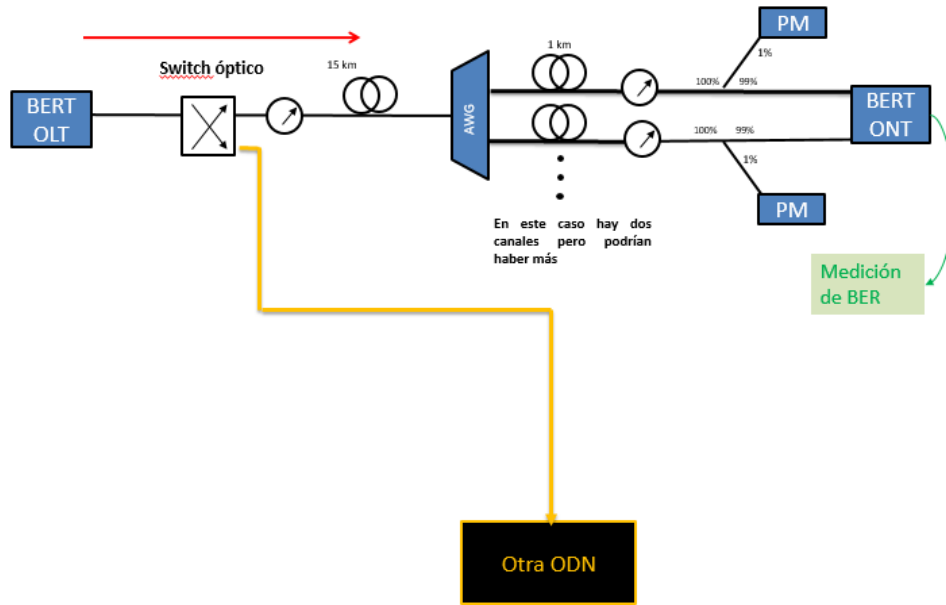


Figura 37: Arquitectura del escenario WDM-PON clásica

J. Montalvo, A. Tapetado, D.S. Montero, C. Vázquez, "WDM-PON Preventive Optical Monitoring System with Colourless Reflectors", Optical Fiber Conference, 2016.

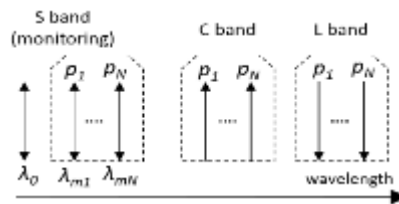


Figura 38: Bandas de trabajo de la técnica de monitorización óptica preventiva con reflectores comunes

J. Montalvo, A. Tapetado, D.S. Montero, C. Vázquez, "WDM-PON Preventive Optical Monitoring System with Colourless Reflectors", Optical Fiber Conference, 2016.

Finalmente, en la recepción de las señales en cada ONU se utiliza un atenuador VOA que simula el fallo en la rama cuando el valor del atenuador supera un valor determinado. Además, justo después se usan fotodiodos para convertir las señales ópticas a eléctricas, un filtro paso bajo, un recuperador de señal que replica la señal de entrada compensando el retardo que ha sufrido dicha señal durante la propagación por la red óptica y posteriormente se coloca el *driver* receptor para así, poder obtener los diagramas de ojo y calcular la BER.

### 11.3.2. Escenario red WDM-PON con sistema de monitorización

En el segundo escenario, se añaden los elementos necesarios para aplicar la técnica de monitorización en el escenario anterior, como se puede observar en la figura 38.

Se utilizan dos láseres de monitorización (*Laser CW* en VPI) con longitudes de onda 1469.68 nm ( $\lambda_{m1}$ ) y 1470.33 nm ( $\lambda_{m2}$ ) cuya separación en frecuencia es de 90 GHz. Estos parámetros cumplen con los requisitos del estándar G.698.3 [23] de la ITU (Anexo IV) en el enlace descendente. Esta separación en frecuencia es idéntica a la de las fuentes de datos para la correcta configuración del AWG en la simulación. En la técnica de



monitorización se utiliza una fuente BLS para la monitorización, que ocupa las dos longitudes de onda utilizadas. Sin embargo, para que el diseño de la simulación sea más sencillo y consuma menos recursos se utilizan dos láseres centrados en las longitudes de onda necesarias. También se utiliza una fuente de láser que sirve como referencia ( $\lambda_0$  en el apartado 7.10) con una longitud de onda de 1490 nm. Estas tres fuentes tienen un ancho espectral de 0.09 nm y se encuentran en el espectro de la banda S (figura 37).

Con el objetivo de independizar la parte de monitorización y la de datos, se separan las tres fuentes de láser dedicadas a la monitorización mediante un *switch*. En la simulación, este *switch* lo configuramos con los mismos parámetros que el *switch* que se estudia y caracteriza en este documento por si fuera necesario utilizarlo para esta función. De esta manera, se puede activar o desactivar la monitorización de la red óptica. Si desactivamos la parte de monitorización las únicas señales que se transmiten por la red son las señales de datos.

Para transportar las señales multiplexadas por la fibra de alimentación se utiliza un AWG cíclico. Se utiliza una fibra de alimentación de 15 km de longitud que transmite la señal multiplexada. Justo después de este AWG, se coloca el *switch* óptico que hemos caracterizado con el objetivo de separar dos ODNs. La caracterización del *switch* óptico realizada en este trabajo, se ha hecho con longitudes de onda ligeramente distintas debido a que la simulación se ha realizado en enlace descendente. La caracterización del *switch* óptico nos aporta valores con una ligerísima variación. Antes del carrete de fibra, se coloca un atenuador óptico (VOA) para poder simular que se produce un error en la fibra de alimentación, aumentando el valor de este atenuador. Posteriormente, colocamos un FBG (Bo) que refleja la señal de referencia  $\lambda_0$  (1490 nm) con un ancho espectral de 0.5 nm y el AWG que demultiplexa la señal para las dos ONUs. En el primer canal se recibe la señal de datos de 1589.65 nm y la de monitorización de 1470.33 nm, mientras que en el segundo canal se recibe la señal de datos de 1588.84 nm y la de monitorización de 1469.68 nm. Después de cada fibra de distribución se coloca un FBG idéntico (B) en cada ONU o canal, para reflejar la señal de monitorización correspondiente. Estos dos FBGs son idénticos y centrados en 1470 nm de tal manera que tengan la anchura espectral suficiente para cubrir las dos longitudes de onda de monitorización. Por ello, se configuran con un ancho espectral de 5 nm.



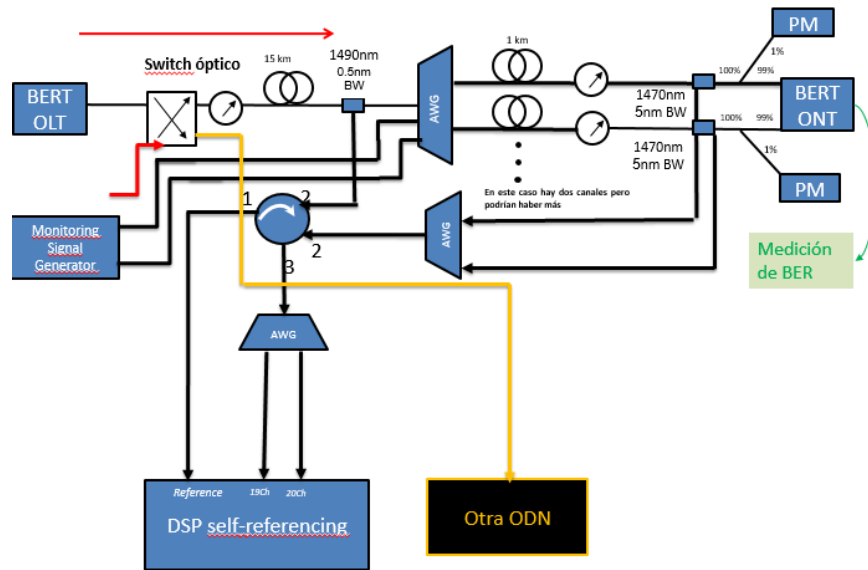


Figura 39: Arquitectura del escenario WDM-PON con el sistema de monitorización

J. Montalvo, A. Tapetado, D.S. Montero, C. Vázquez, "WDM-PON Preventive Optical Monitoring System with Colourless Reflectors", Optical Fiber Conference, 2016.

La utilización de la transmisión bidireccional en una simulación en VPI es compleja y es necesario cambiar el modo de la simulación ya que hay que transmitir muestras en vez de bloques de muestras. Para evitar dificultades, utilizaremos FBGs con dos salidas por las que salen la señal reflejada y la transmitida. De esta manera, a partir del puerto por el que sale la reflejada, replicamos la red hacia atrás para simular la dirección ascendente de la red. Además, utilizamos un circulador para que las señales reflejadas no vuelvan a las OLTs en enlace ascendente. En el diseño original, se utilizan dos circuladores para encaminar las señales reflejadas de 1490 nm y 1470 nm, pero en el caso del diseño de este trabajo sólo es necesario utilizar un circulador debido a que la simulación no es bidireccional. No son necesarios dos circuladores porque no es necesario colocar filtros en enlace ascendente para filtrar las señales reflejadas de monitorización. Aunque en el circulador de la figura 39 hay 4 flechas, solo tiene 3 puertos. El puerto utilizado en cada caso se indica en la figura 39.

Finalmente, se multiplexan las señales reflejadas de 1469.68 nm y 1470.33 nm y se introduce en el circulador para volver a demultiplexarlas, simulando así la dirección en enlace ascendente de las señales reflejadas. Se utilizan AWGs cíclicos en toda la simulación. Para finalizar, la señal que se refleja de 1490 nm también se introduce en el circulador, obteniendo así las tres señales reflejadas a la salida del circulador. Estas tres señales se enviarían al OMM, aunque como se ha explicado anteriormente, este trabajo no estudiará el funcionamiento de este dispositivo.

En ambos escenarios, se insertan acopladores 99/1 en los receptores antes del fotodiodo. En los acopladores se conectan medidores de potencia en los puertos del 1%.

### Características de los dispositivos utilizados

En este apartado se explica la configuración de los dispositivos fundamentales de la simulación en VPI. La configuración de los parámetros de los demás dispositivos se indicará en el Anexo V.



### Emisores y receptores

Para la transmisión y recepción de datos se utilizan láseres pulsados y fotodiodos (dos láseres en transmisión y dos fotodiodos en recepción) para ambos canales. Ambos funcionan con longitudes de onda de 1588.89 nm y 1589.653 nm. En las tablas 13 y 14 se muestran los parámetros generales con los que se configuran los emisores y los receptores, respectivamente.

Laser Pulsed de VPI		
Tasa de bit	12,5 Gb/s	
Linewidth	1 GHz	
Ancho de banda	25 GHz	
Potencia de media de transmisión	$\lambda = 1588,84 \text{ nm}$	$\lambda = 1589,65$
	-15,83 dBm	-15,73 dBm

Tabla 13: Parámetros generales de los emisores Laser Pulsed

Receptor Fotodiodo APD en VPI		
Responsividad	1 A/W	
Sensibilidad	BER	-28 dBm
	$<10^{-9}$	
Ruido térmico	$10^{-12} \text{ A } / \sqrt{\text{Hz}}$	
Factor de multiplicación por avalancha	10	

Tabla 14: Parámetros generales de los fotodiodos APD

### Array Waveguide Grating (AWG)

En la simulación, se utilizan varios AWGs cíclicos para multiplexar y demultiplexar las señales. Estos dispositivos están disponibles en el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas del Departamento de Tecnología Electrónica, y tienen una capacidad de hasta 32 canales. La utilidad de que sean cíclicos, es que permiten el paso de más de un rango de longitudes de onda. Como los emisores transmiten a 1588.84 nm y 1589.65 nm, se utilizan el canal 19 (ocupa aproximadamente de 1587 a 1590 nm) y el canal 20 (ocupa aproximadamente de 1588 nm a 1591 nm) en la banda L del espectro de longitudes de onda.

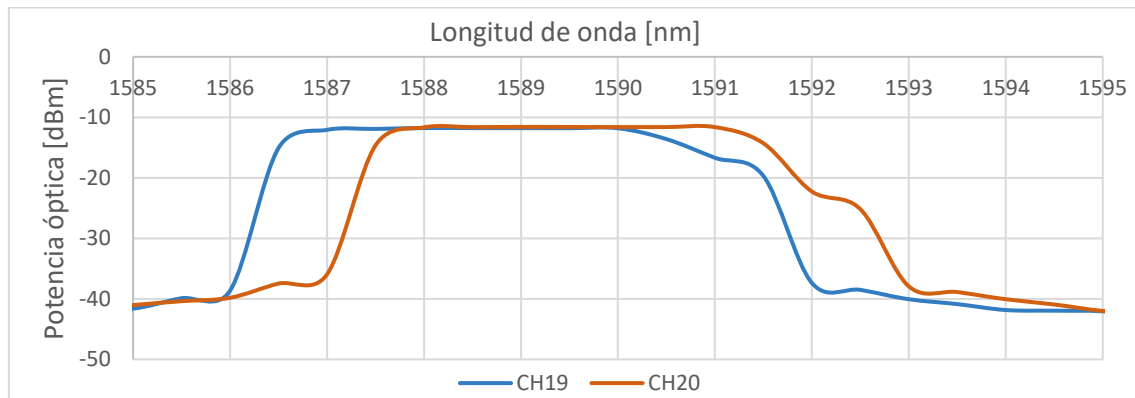


Figura 40: Espectro de transmisión de potencia de los canales 19 y 20 en la banda L de los AWGs utilizados en el montaje del escenario del caso de estudio

### Redes de Bragg en fibra óptica: Fiber Bragg Grating (FBG)

Para reflejar las señales de monitorización son necesarios dispositivos FBGs en la fibra de alimentación y en las dos de distribución de los dos canales. El espectro de longitud de onda del FBG que refleja la señal de referencia de 1490 nm, que se coloca en la fibra de alimentación, se muestra en la figura 41 y tiene una anchura espectral de 0.5 nm. El espectro de los FBGs de las fibras de distribución que están centrados en 1470 nm, aparece en la figura 42 y tienen una anchura espectral de 5 nm. El ancho de banda de los FBGs de las fibras de distribución se encuentra en la primera banda de paso, en la banda S de los canales 19 y 20 de los AWGs (figura 43). Esto permite que las señales reflejadas por los FBGs pueden pasar por los AWGs para poder ser enviadas al OMM, donde se analizan dichas señales en la técnica de monitorización.

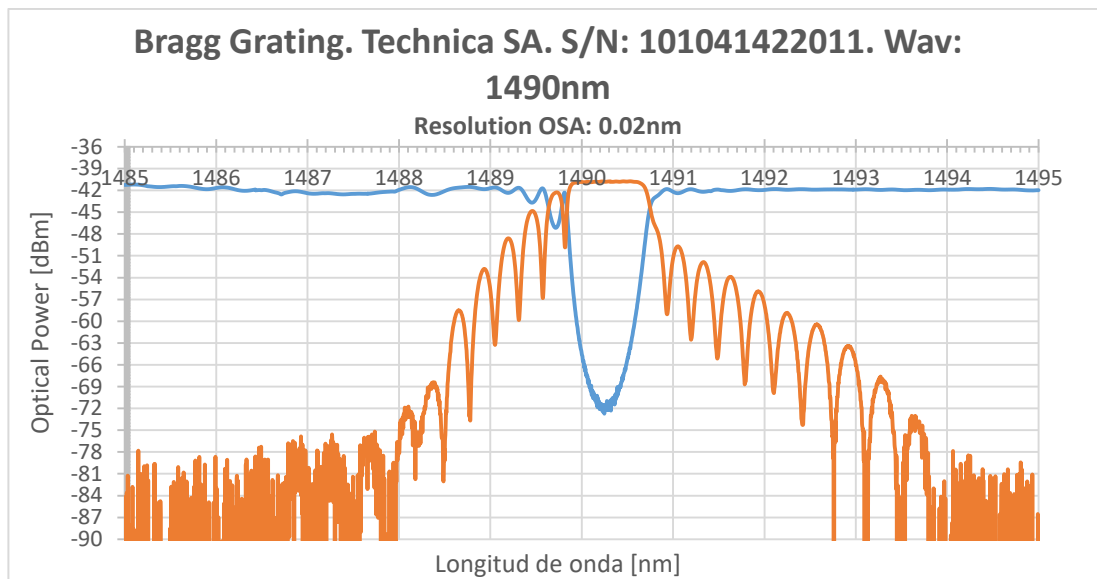


Figura 41: Espectro de potencia del FBG centrado en 1490 nm situado en la fibra de alimentación

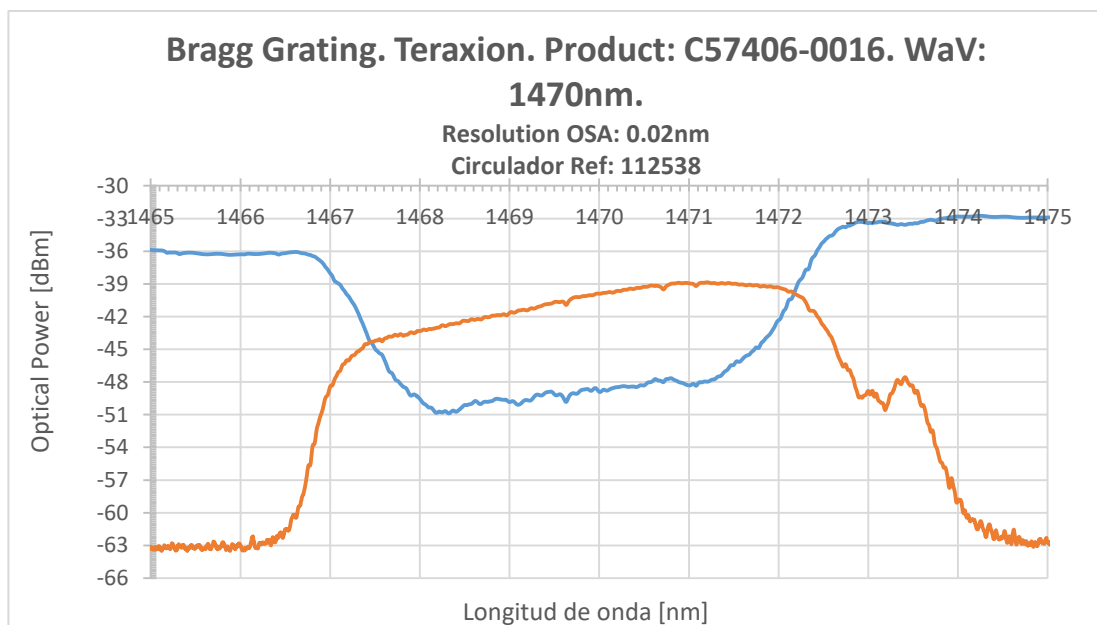


Figura 42: Espectro de potencia de los FBGs centrados en 1470 nm que se sitúan en las fibras de distribución

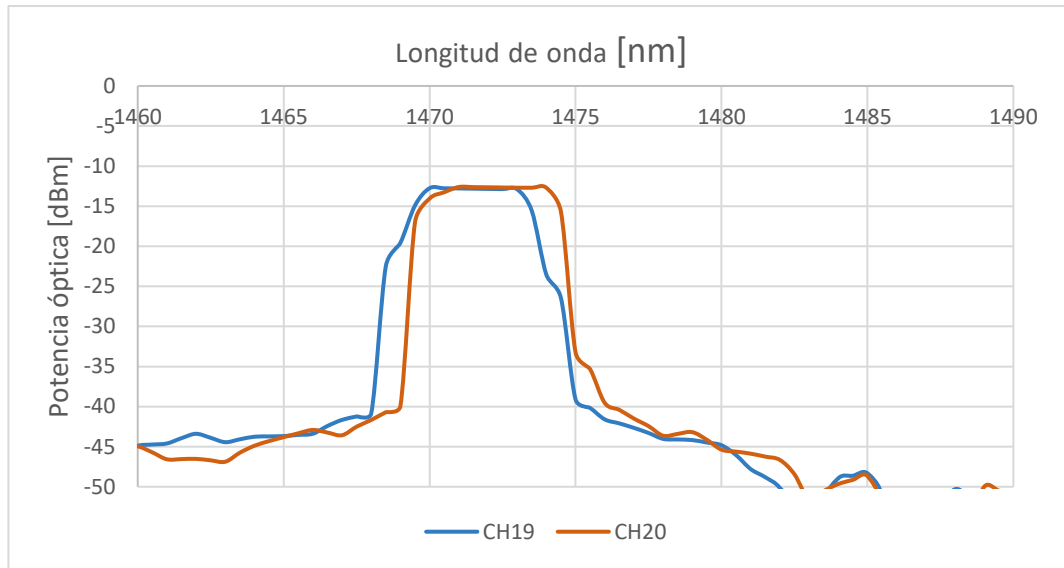


Figura 43: Espectro de transmisión de potencia de los canales 19 y 20 de los AWGs en la banda S

#### 11.4. Medidas del balance de potencias

##### *Descripción de las medidas*

Las medidas de la potencia se realizan en el receptor de las ONUs, en los dos escenarios propuestos en el apartado 11.2 y cuyo diseño se muestra en las figuras 38 y 39. El medidor de potencia se conecta al acoplador 99/1. La potencia que llega a las ONUs se calcula a partir de la relación del acoplador y de la potencia que se mide en el medidor de potencia. Se realizan varias simulaciones para obtener distintas medidas con valores de los VOAs diferentes. La atenuación de los VOAs varía desde 0 dB hasta 8 dB, en saltos de 1 dB.

##### *Resultados*

En las tablas 15 y 16 se indican las medidas realizadas en los escenarios de la red WDM-PON sin el sistema de monitorización y con dicho sistema, respectivamente. En cada escenario y para cada canal, se indica en la segunda columna, la potencia óptica emitida por los *Laser Pulsed*. En la tercera columna se indica el valor de atenuación del VOA, aunque en estas medidas siempre se usa un valor de 0 dB. En la cuarta columna se indica la potencia óptica que se recibe en el puerto 100% del acoplador que se coloca en las ONUs. Finalmente, en la última columna se indican las pérdidas de inserción que se producen desde el *Laser Pulsed* hasta el puerto 100% del acoplador.

Las potencias medidas en la emisión del láser, en la fibra de alimentación y en el receptor, cumplen con el estándar G.698.3 [23] de la ITU en enlace descendente (Anexo IV).

Longitud de onda	Potencia óptica emitida [dBm]	Atenuación VOA [dB]	Potencia óptica recibida (puerto 100% del acoplador) [dBm]	Pérdidas de inserción antes del acoplador [dB]
Canal 19: 1588,84 nm	-15,79	0	-27,82	12,03
Canal 20: 1589,65 nm	-15,725	0	-28,045	12,32

Tabla 15: Valores de las medidas de potencia sobre el escenario WDM-PON sin el sistema de monitorización de auto-referencia



Longitud de onda	Potencia óptica emitida [dBm]	Atenuación VOA [dB]	Potencia óptica recibida (puerto 100% del acoplador) [dBm]	Pérdidas de inserción antes del acoplador [dB]
Canal 19: 1588,84 nm	-15,83	0	-28,25	12,42
Canal 20: 1589,65 nm	-15,73	0	-28,45	12,72

Tabla 16: Valores de las medidas de potencia sobre el escenario WDM-PON con el sistema de monitorización de auto-referencia

Además en las figuras 44 y 45, se muestran las pérdidas de inserción en función del valor de la atenuación en los VOA, para los canales 19 y 20, respectivamente.

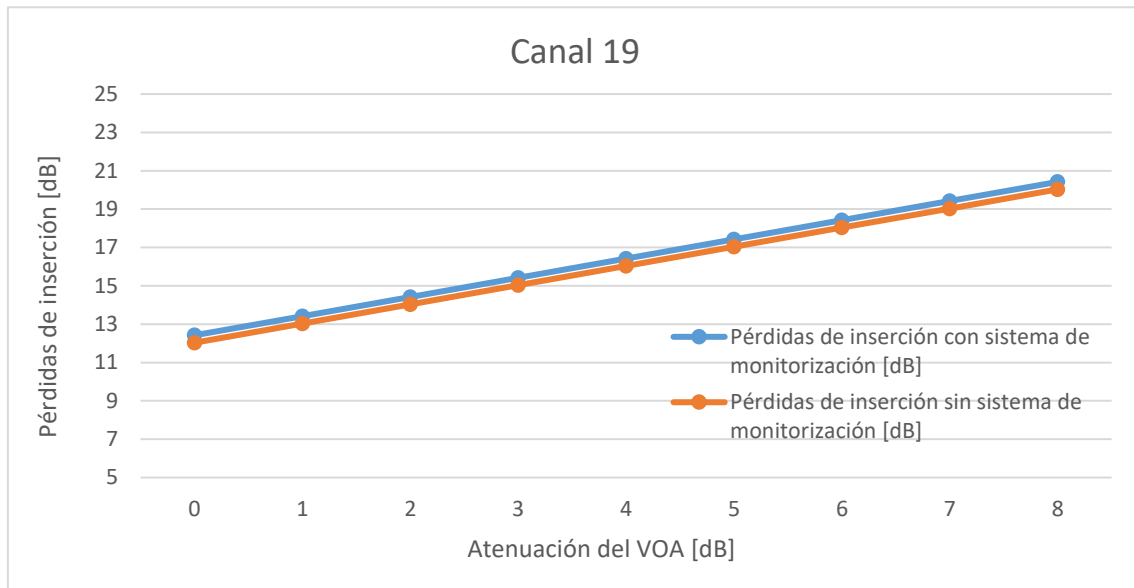


Figura 44: Pérdidas de inserción en el canal 19 para los dos escenarios con diferentes atenuaciones del VOA

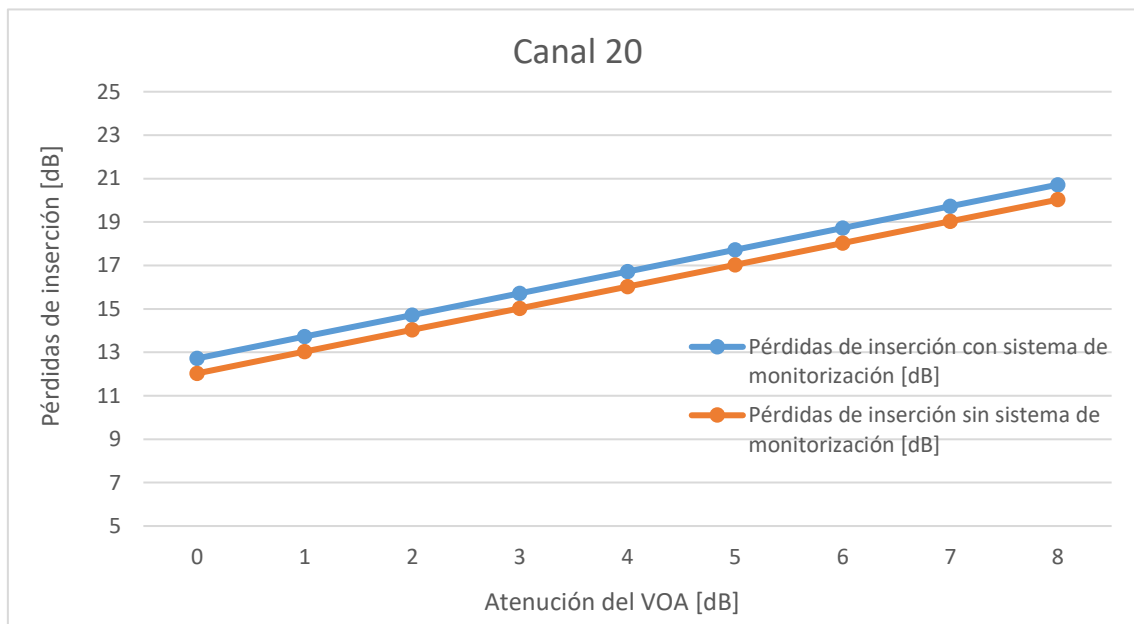


Figura 45: Pérdidas de inserción en el canal 20 para los dos escenarios con diferentes atenuaciones del VOA

### *Discusión de los resultados*

Con las medidas y gráficas anteriores se puede sacar como conclusión que el sistema de auto-referencia no introduce pérdidas. En las medidas del canal 19, las pérdidas por la utilización del sistema de monitorización son de 0.39 dB y de 0.4 dB en el canal 20. Ambos valores son los correspondientes con una valor de atenuación en el VOA de 0 dB. Estas pérdidas adicionales que añade el sistema de monitorización, se deben a la inserción del FBG de referencia y los FBGs de las fibras de distribución.

En las figuras 44 y 45 se observa como la variación de las pérdidas de inserción se mantiene constante. Esto significa que las pérdidas de inserción del sistema de monitorización aumentan linealmente conforme el valor de la atenuación de los VOAs aumenta. También se puede destacar que la diferencia entre las pérdidas de los dos canales en el escenario 1 (tabla 15) es de 0.29 dB y de 0.3 dB en el escenario 2 (tabla 16). Como es lógico, estos dos valores son muy similares y su mínima diferencia se debe a la posible imprecisión a la hora de coger los decimales en las medidas.

### **11.5. Medidas de la BER**

La BER es una tasa de error con la que se evalúa habitualmente los sistemas de transmisión de datos digitales. Es importante analizar la calidad de los dos escenarios planteados en este trabajo, en cuanto a la tasa de error binaria. El primer paso es establecer un valor límite de la BER, hasta el cual se pueda garantizar una transmisión de datos aceptable. En el caso de las redes NG-PON2 de última generación, la BER se limita hasta  $10^{-3}$ , es decir, a partir de este valor no se garantiza una transmisión de datos con la suficiente calidad.

### *Descripción de las medidas*

Para los valores de las medidas de potencia anteriores, también se han extraído los valores de la BER en los canales 19 y 20 para las correspondientes ONUs. Los valores de la BER son obtenidos después de que la señal óptica que llega al fotodiodo es convertida a eléctrica y ésta, se envía a un filtro paso bajo y a un recuperador que compensa el retardo de la señal. En este punto ya se ha recuperado las señales digitales que llegan a las ONUs o canales con las que se obtienen los valores de la BER.

La sensibilidad en el fotodiodo se ha fijado en -28 dBm y con una BER mínima de  $10^{-9}$ . Esta sensibilidad se alcanza cuando los atenuadores VOA tienen un valor de 0 dB. La variación del valor de atenuación de los VOA será la misma que la utilizada en las medidas de potencia (de 0 a 8 dB en saltos de 1 dB) hasta obtener la BER máxima igual a  $10^{-3}$  con un valor del VOA de 8 dB.

### *Resultados*

En las figuras 46 y 47 se muestran los valores de la BER en los canales 19 y 20, en unared WDM-PON sin el sistema de monitorización y con el sistema de monitorización, respectivamente. En ambas gráficas, los valores de la BER se mueven en un rango de  $10^{-9}$  a  $10^{-3}$  aproximadamente. Estos dos valores se corresponden con el valor de la BER cuando en el receptor se obtiene un valor de potencia igual a la sensibilidad (-28 dBm) y el máximo valor de la BER aceptado por el sistema, respectivamente.

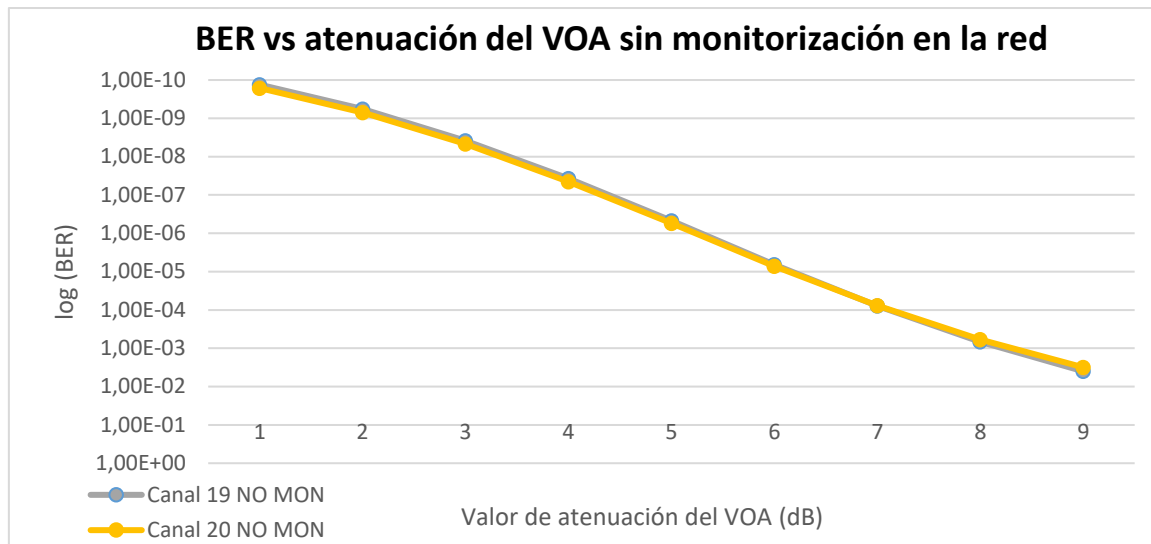


Figura 46: Valores de la BER medidos en los canales 19 y 20 en función de la atenuación de los VOAs en la red WDM-PON sin el sistema de monitorización

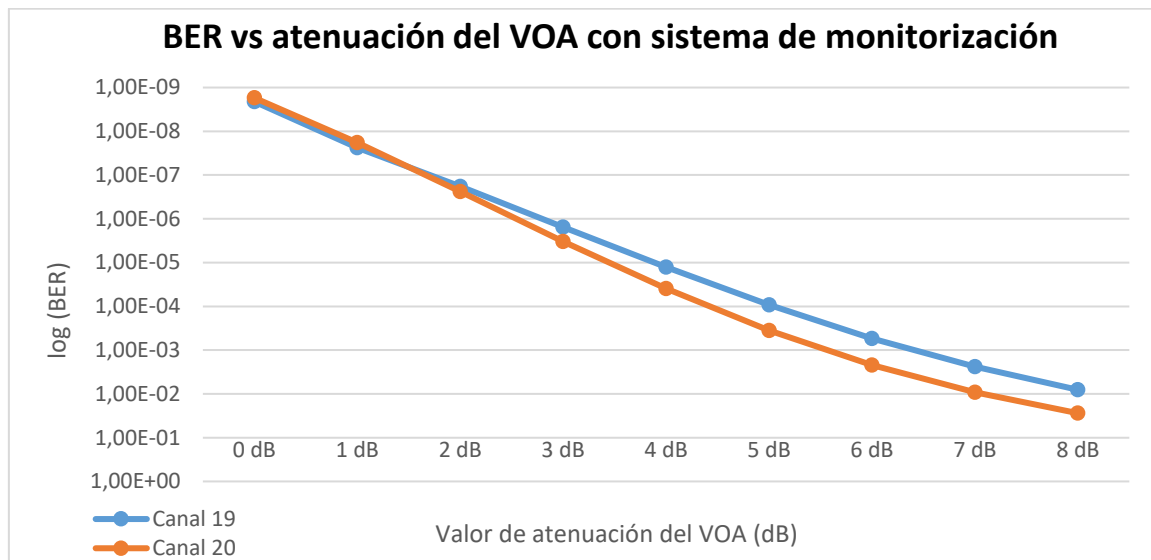


Figura 47: Valores de la BER medidos en los canales 19 y 20 en función de la atenuación de los VOAs en la red WDM-PON con el sistema de monitorización

### Discusión de los resultados

En las figuras 46 y 47, el rango de valores de la BER está aproximadamente entre  $10E-9$  y  $10E-2$ . El valor máximo aceptado para que la transmisión de datos sea correcta según el estándar, es  $10E-3$  y el valor mínimo que aparece de la BER es aproximadamente  $10E-9$ . Este valor se corresponde con el valor de calidad de la BER que queremos conseguir, con el cual fijamos la sensibilidad del receptor. Si se utilizan valores de potencia mayores en los láseres emisores la BER disminuirá y por tanto la transmisión de datos será más fiable en cualquiera de los escenarios.

Lo primero que se puede observar es que la gráfica sin el sistema de monitorización cuando el VOA es igual a 0 dB, tiene un valor menor de BER debido a que la red WDM-PON con el sistema de monitorización inserta mayores pérdidas. Además, la pendiente

de bajada de la BER en la gráfica de la figura 47, es más rápida que en la figura 46, ya que la red WDM-PON con el sistema de monitorización se vuelve más sensible con respecto a la BER, debido a unas mayores pérdidas de inserción.

Como se ha indicado anteriormente, el límite aceptable de la BER en las redes NG-PON2 es de  $10E-3$ . En la figura 46, este valor se obtiene aproximadamente, cuando el valor de atenuación de los VOA es de 8 dB y se obtiene aproximadamente con un valor de 7 dB en la gráfica de la figura 47.

Por último, es necesario explicar las diferentes tendencias que tienen las curvas de la BER del canal 19 y 20, en la red WDM-PON con sistema de monitorización (figura 47). Esto puede deberse a que en este escenario existen mayores pérdidas de inserción y el sistema se vuelve más sensible a la dispersión cromática. Si esto es así, es lógico que el canal 20 tenga una mayor velocidad en cuanto al decremento de la BER, ya que este canal trabaja con una longitud de onda más alta. Sin embargo, al ser pequeña el espacio entre las dos longitudes de onda, la tendencia tampoco es muy diferente entre los dos canales.

Todos los resultados y conclusiones obtenidas están condicionadas con las potencias, anchos de banda, longitudes de fibra... con los que ha sido configurada la simulación. Los parámetros de los dispositivos en la simulación se detallarán más en el Anexo V.

### 11.5. Conclusiones del caso de estudio

En este caso de estudio, se ha explicado que alternativas hay para colocar el *switch* óptico caracterizado en la sección 10 de este trabajo y posteriormente se han planteado los dos escenarios que se utilizan en el caso de estudio. La simulación se ha limitado a estudiar el enlace descendente en ambos escenarios WDM-PON (transmisión de datos desde los OLTs a las ONUs) y la llegada de las señales reflejadas de monitorización al OMM. Sin embargo, no se estudia la parte electrónica de este dispositivo en el que se realizan los cálculos de fase y parámetros de auto-referencia, entre otros procesos, para detectar los fallos.

Finalmente, se ha realizado un balance de potencias y un análisis de la BER. Con esto se ha conseguido garantizar una BER de  $10E-9$  con una sensibilidad de -28 dBm y se ha comprobado como el sistema de monitorización inserta unas pérdidas de 0.4 dB aproximadamente. Además, se ha medido que valor máximo pueden tener los VOAs para que la BER sea mejor que  $10E-3$ . Este valor es de 7 dB en la red WDM-PON con el sistema de monitorización y 8 dB sin el sistema de monitorización.



## Chapter 12. Conclusions

As it has been explained in the theoretical part of this document, the number of users in PON is in constant increase, as well as its complexity, capacity, scalability... These multiple monitoring techniques of failure detection are adapted to the needs that each network requires, as has been indicated in the comparison tables of the chapter 9.

The current trend is to use hybrid TDM-WDM networks that accumulate the advantages of the TDM-PON and WDM-PON networks. These kind of networks combine the advantages of the monitoring techniques of both architectures explained in this document, according to their needs. In the absence of developing more advanced techniques for these networks, the most suitable techniques are those compatible with TDM-PON and WDM-PON as the technique based on tunable OTDR.

Monitoring costs are rising because of the needs of designing networks with the capacity to serve more users and with higher speeds. In addition, operators are interested in applying techniques with the smallest number of possible elements to minimize failures and costs. The use of an OTDR in each branch would not meet this requirement, as well as the excessive use of passive components. Furthermore, networks that serve a large number of users require an excessive real time to monitor the entire network.

With regard to the commercial products explained in this document, we can see that the business objectives are to offer complete analysis to detect and locate faults. In addition, some products allow having additional features such as the collection of data and statistics of faults. Furthermore, there is a tendency to design systems that can be used by several operators at the same time. It allows the network to be more efficient as the majority of the operators share resources on the network.

To conclude, this work develops a simulation of the optical monitoring system with colourless reflectors. It is developed with the application Virtual Photonics Instrumentation (VPI). With this simulation, we show that you could get a good BER without raising the power of the emitting lasers, in a WDM-PON network with this monitoring system. In addition, it has been demonstrated that when we enter the monitoring system in a WDM-PON network, the inserted losses are small. To do this, it has been made a power balance and an analysis of the BER. Both processes have been based on the values of the VOAs attenuations included in the network.





### Capítulo 13. Retos y direcciones futuras

Ahora que el trabajo está realizado, nos debemos plantear que tareas pueden realizarse con posterioridad, con el objetivo de evolucionar los contenidos que aparecen en este trabajo. Las nuevas aportaciones pueden ser:

- Investigar y estudiar las evoluciones de las técnicas de monitorización manuales y automáticas de redes ópticas, que se han mencionado en este trabajo.
- Estudiar nuevas técnicas de monitorización de redes ópticas en desarrollo, haciendo hincapié en las que se aplican en redes WDM-PON.
- Ampliar este trabajo con otros escenarios WDM-PON en los que se coloque el *switch* óptico caracterizado en el trabajo, en los otros dos emplazamientos mencionados en el capítulo 11.
- Repetir el trabajo del caso de estudio en enlace ascendente, es decir, simular que las ONUs envían datos a los OLTs.
- Completar el trabajo con el estudio del comportamiento del OMM cuando recibe las señales de monitorización. Para ello, las fuentes de monitorización deben modularse con una señal sinusoidal para calcular posteriormente, el desfase entre la señal de referencia  $\lambda_0$  y las de monitorización reflejadas por cada canal ( $\lambda m_i$ ), y los parámetros de auto-referencia. De esta manera se calcula la fase eléctrica entre estas señales y la atenuación de cada rama para realizar la detección de fallos.



## Bibliografía

- [1] Juan Sebastián Guevara Henao, “Tecnologías de Redes PON”, páginas 1-2, 2015.
- [2] Ramón Jesús Millán Tejedor, “NG-PON”, Conectronica nº 154, GM2 Publicaciones Técnicas, 2012.
- [3] Yang Qiu, Chun-Kit Chan, “Optics Communications: A novel survivable architecture for hybrid WDM/TDM passive optical networks”, Volumen 312, páginas 52–56, 2014.
- [4] Jingjing Zhang and Nirwan Ansari, Fellow, “Scheduling Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks With Nonzero Laser Tuning Time”, IEEE/ACM Transactions On Networking, Volumen 19, nº 4, páginas 1014-1015, Agosto 2011.
- [5] João Batista Rosolem, Rivaél Strobel Penze, Edson Wilson Bezerra, Fernando Rocha Pereira, Bruno César de Camargo Angeli, Eduardo Mobilon, Júlio César Said, Antônio Donizete Coral, “Arquiteturas baseadas em WDM para as próximas redes PON”, páginas 65-76, 2010.
- [6] ITU-T G.989.2 Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks Digital Sections and Digital Line System – Optical Line Systems For Local And Access Networks, Appendix II: Physical Layer Measurements Required To Support Optical Layer Supervision, página 64, 2014.
- [7] Alan E. Willner, Jeng-Yuan Yang, and Xiaoxia Wu, “Optical Performance Monitoring to Enable Robust and Reconfigurable Optical High-Capacity Networks”, Journal Of Lightwave Technology, páginas 1-4, 2011.
- [8] Changyuan Yu, Jing Yang and Yi Yu, “Dispersion and OSNR Monitoringh in High-Speed Optical Fiber Communicaion System”, International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), páginas 118-121, 2012.
- [9] The Fiber Optic Association, “Guide To Fiber Optics & Premises Cabling”, <http://www.thefoa.org>.
- [10] Maged Abdullah Esmail, and Habib Fathallah, “Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey”, IEEE communications surveys & tutorials, Volumen 15, nº 2, páginas 943-958, 2013.
- [11] Bert De Mulder, Wei Chen, Johan Vandewege and Xing-Zhi Qiu, “Noninstrutive Fiber Monitoring of TDM Optical Networks”, Journal of Lightwave Technology, Volumen 25, nº1, páginas 305-317, Enero 2007.
- [12] Golnabi, H.; Bahar, M.; Razani, M.; Abrishami, M.; Asadpour, A, “Optics and Lasers in Engineering” Volumen 45, Capítulo 1, páginas 126–130, Enero 2007.
- [13] Tong Zhao Hong Han JianGuo Zhang XiangLian Liu XiaoMing Chang AnBang Wang YunCai Wang. “Precise Fault Location in TDM-PON by Utilizing Chaotic Laser Subject to Optical Feedback”, IEEE Photonics Journal, Volumen 7, Capítulo 6, Diciembre 2015.



- [14] J. Montalvo, A. Tapetado, D. S. Montero and C. Vázquez, “New Fiber Supervision Technique for Passive Optical Networks Supporting Mobile Services”, IEEE Photonics, páginas 1-4, 2015.
- [15] Francisco Javier Tahoces López, Trabajo de Fin de Master “Medidas con BERT y OTDR y su aplicación en la monitorización de una red de acceso WDM-PON”, tutora: Carmen Vázquez, Universidad Carlos III de Madrid.
- [16] J. Montalvo, D.S. Montero, C. Vázquez, J.M. Baptista, J.L. Santos “Radio-frequency self-referencing system for monitoring drop fibres in wavelength division multiplexing passive optical networks”, Volumen 4, Capítulo 6, páginas 226– 234, IET Optoelectron., 2010.
- [17] Mohammad M. Rad: University of Waterloo, Kerim Fouli: Optical Zeitgeist Laboratory, INRS, Habib A. Fathallah: King Saud University, Leslie A. Rusch, Martin Maier: “Passive Optical Network Monitoring: Challenges and Requirements”, IEEE Communications Magazine, páginas 45-51, February 2011.
- [18] J. Montalvo, A. Tapetado, D.S. Montero, C. Vázquez, “WDM-PON Preventive Optical Monitoring System with Colourless Reflectors”, Optical Fiber Conference, 2016.
- [19] Eric Borland, Josep Prat Goma, “Sistema de monitorización de redes ópticas de acceso con multiplexación en longitud de onda” Universitat Politècnica de Catalunya, páginas 25-68, Julio 2014.
- [20] Promax Electrónica. “Monitorización de redes de acceso WDM-PON”, Informe Técnico, <http://www.promax.es> , Barcelona, 1 de Octubre de 2011.
- [21] Agizer, “Remote Fiber Testing System” <http://agizer.com/products/rfts>
- [22] Web del programa VPI<sup>TM</sup> photonics [www.vpiphotonics.com](http://www.vpiphotonics.com)
- [23] ITU-T G.698.3, Transmission Systems And Media, Digital Systems And Networks, Transmission media and optical systems characteristics – Characteristics of optical systems, “Multichannel seeded DWDM applications with single-channel optical interfaces”, páginas 11-12, Febrero 2012.



## **Anexo I. Pliego de Condiciones**

Este proyecto dedicado al Trabajo de Fin de Grado, se ha realizado en el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas del Departamento de Tecnología Electrónica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. Toda la información, documentación y simulaciones desarrolladas están condicionados por los siguientes puntos:

- La directora del proyecto ha sido la Dra. Carmen Vázquez García, Catedrática del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid.
- La propiedad intelectual de los resultados alcanzados en el trabajo pertenecen a la Universidad Carlos III de Madrid.
- La Universidad se reserva el derecho de la utilización total o parcial del presente proyecto, bien para su publicación o para su uso en trabajos o proyectos futuros.
- En cualquier reproducción o utilización de cualquier parte de este trabajo, se indicará la procedencia, especificando el nombre del proyecto, el del ingeniero ponente, su director y el de la Universidad.
- Cualquier modificación que se realice en este trabajo deberá ser notificada al ingeniero ponente del proyecto o al director, y según el criterio de éste, la Universidad decidirá o no la modificación propuesta.
- En caso de no aceptar alguna modificación, la Universidad declinará toda responsabilidad derivada.
- La Universidad tendrá prioridad con respecto a otros solicitantes para la realización de otros proyectos auxiliares que fuesen necesarios para la aplicación industrial que pudiera derivarse de este proyecto, siempre y cuando no renuncie de manera explícita a este derecho.



## Presupuesto

En este apartado se presentará una estimación con respecto a los costes materiales y personales:

### Coste material

La mayoría del equipamiento es compartido por otros proyectos y por ello los costes de estos materiales se reducen a un 10 % del coste total imputado a los materiales.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Coste Total	Coste Total (10%)
Polímetro AMPROBE 37XR-A	1	€250,99	€250,99	€25,10
Placa de circuito impreso PCB	1	€15,00	€15,00	€1,50
Equipo de Soldador (soldador, desoldador, esponja)	1	€28,30	€28,30	€2,83
Rollo de Estaño 1mm	1	€9,20	€9,20	€0,92
Fuente de alimentación EL302Tv TRIPLE POWER SUPPLY	1	€201,20	€201,20	€20,12
Cable Cocodrilo-Banana	2	€4,00	€8,00	€0,80
Tarjeta de Adquisición DAQ NI USB-6009	1	€395,00	€395,00	€39,50
LabVIEW 2015 SP1 versión estudiante (licencia 6 meses)	1	€0,00	€0,00	€0,00
Switch óptico 1X2 OSW-22-135-09-1-N-S-FC/APC	1	€984,60	€984,60	€98,46
Resistencia 1KΩ	10	€0,02	€0,20	€0,02
Resistencia 5KΩ	10	€0,02	€0,20	€0,02
Resistencia 10 KΩ	10	€0,02	€0,20	€0,02
Resistencia 51 KΩ	10	€0,02	€0,20	€0,02
Resistencia 22 KΩ	10	€0,02	€0,20	€0,02
Resistencia 330 Ω	10	€0,02	€0,20	€0,02
Resistencia 56 Ω	10	€0,02	€0,20	€0,02
Condensador 10 uF	2	€0,25	€0,50	€0,05
Condensador 1 nF	25	€0,09	€2,25	€0,23
Regulador LM317	1	€1,86	€1,86	€0,19
Switch de palanca ON-OFF-ON	2	€0,00	€0,00	€0,00
Relé G5V-1	1	€1,99	€1,99	€0,20
Transistor 2N2222A	1	€1,66	€1,66	€0,17
Clemas con dos entradas	6	€0,00	€0,00	€0,00
Zócalo 12 pines	5	€1,17	€5,86	€0,59
Láser óptico SOF-131-C	1	€1.206,00	€1.206,00	€120,60
Medidor de potencia óptica EXFO PM-1100	1	€999,00	€999,00	€99,90
Circulador Óptico CIR-3-22-10-FA FC/APC	1	€684,00	€684,00	€68,40
Sistema Agilent 8164B Light Measurement System	1	€8.240,50	€8.240,50	€824,05
Fotodetector en avalancha APD110C de THORLABS	1	€60,17	€60,17	€6,02
Osciloscopio YOKOGAWA DLM2024	1	€5.301,87	€5.301,87	€530,19
Cable Cocodrilo-BNC	1	€8,00	€8,00	€0,80
Cable BNC-BNC	1	€13,90	€13,90	€1,39
Kit de limpieza de fibra óptica THORLABS FCC-7020 + FCS3	1	€39,60	€39,60	€3,96
Licencia anual de VPI	1	€5,00	€5,00	€0,50
<b>Total</b>		<b>€18.453,49</b>	<b>€18.465,85</b>	<b>€1.846,59</b>



### Coste personal

Concepto	Horas	Coste/Hora	Coste Total
Investigación y elaboración del estado del arte	80	€22,00	€1.760,00
Elaboración de la placa controladora del <i>switch</i> óptico	30	€22,00	€660,00
Manejo del código en Labview	6	€22,00	€132,00
Comprobación del funcionamiento del <i>switch</i> óptico	3	€22,00	€66,00
Pruebas eléctricas de funcionamiento del <i>switch</i> óptico	15	€22,00	€330,00
Pruebas ópticas de funcionamiento del <i>switch</i> óptico	15	€22,00	€330,00
Caracterización del <i>switch</i> óptico en las diferentes longitudes de onda	30	€22,00	€660,00
Diseño y simulación en VPI	60	€22,00	€1.320,00
<b>Total</b>			<b>€5.258,00</b>

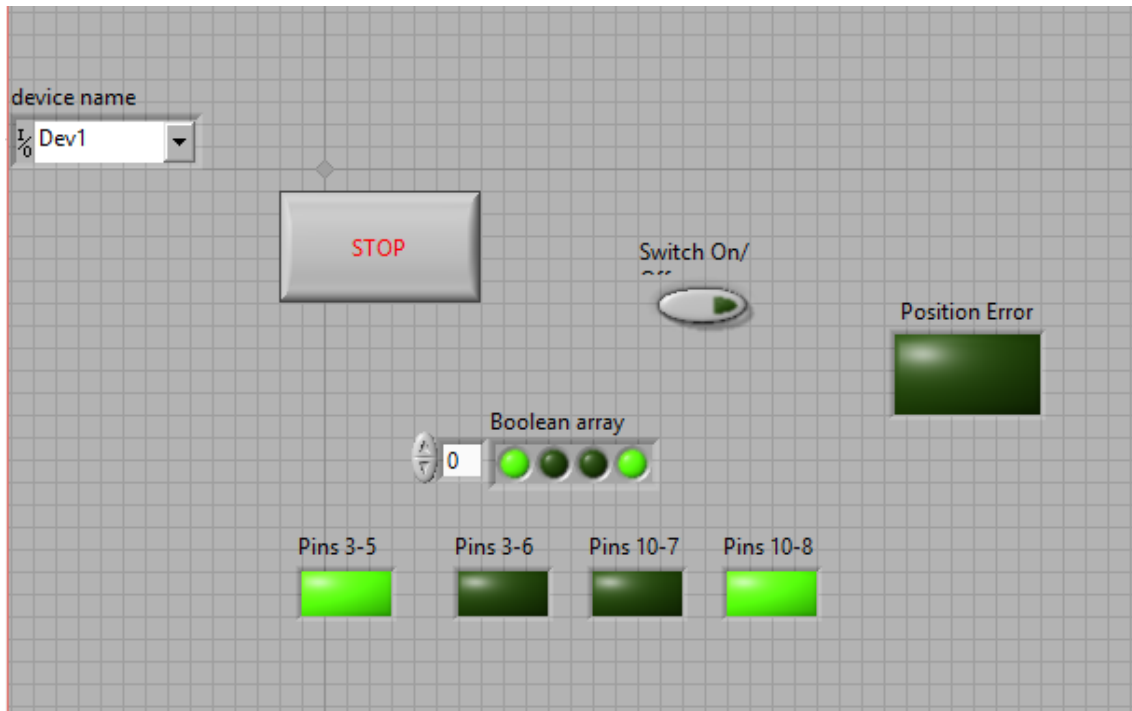
### Coste total

<b>Coste Material</b>	€1.846,59
<b>Coste Personal</b>	€5.258,00
<b>Coste Total</b>	€7.104,59

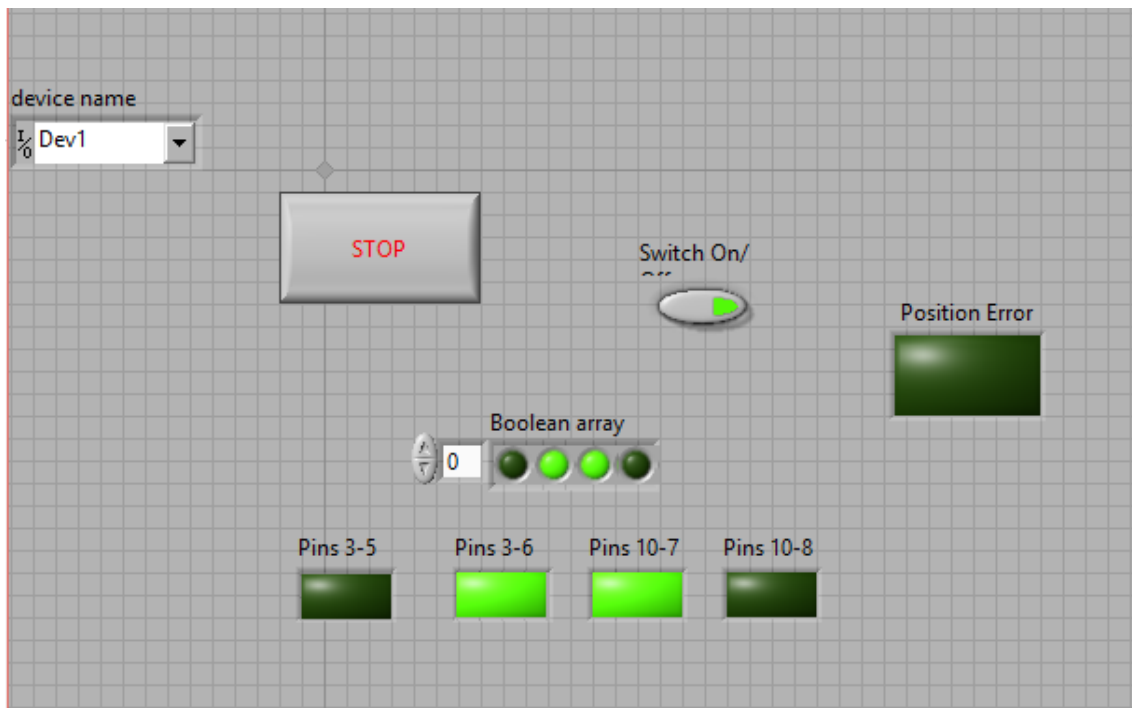


## Anexo II. Capturas del desarrollo en Labview

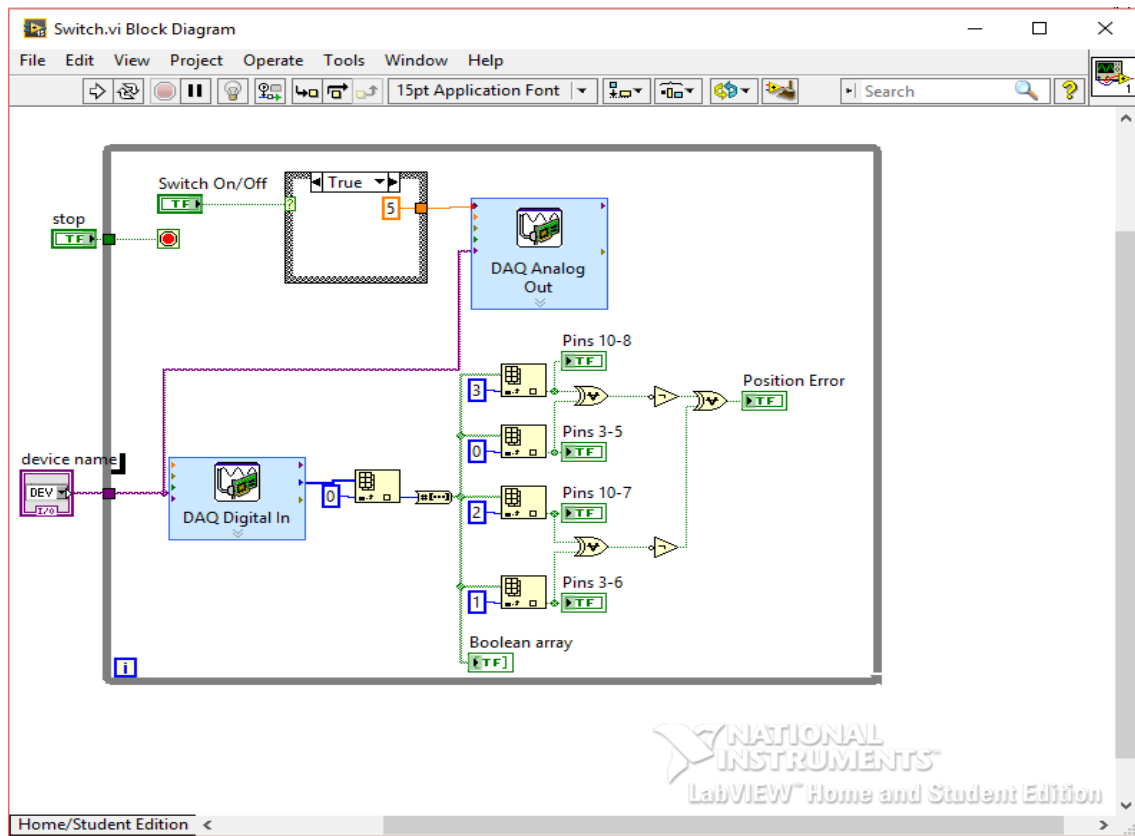
### Front Panel con el *switch* en modo OFF



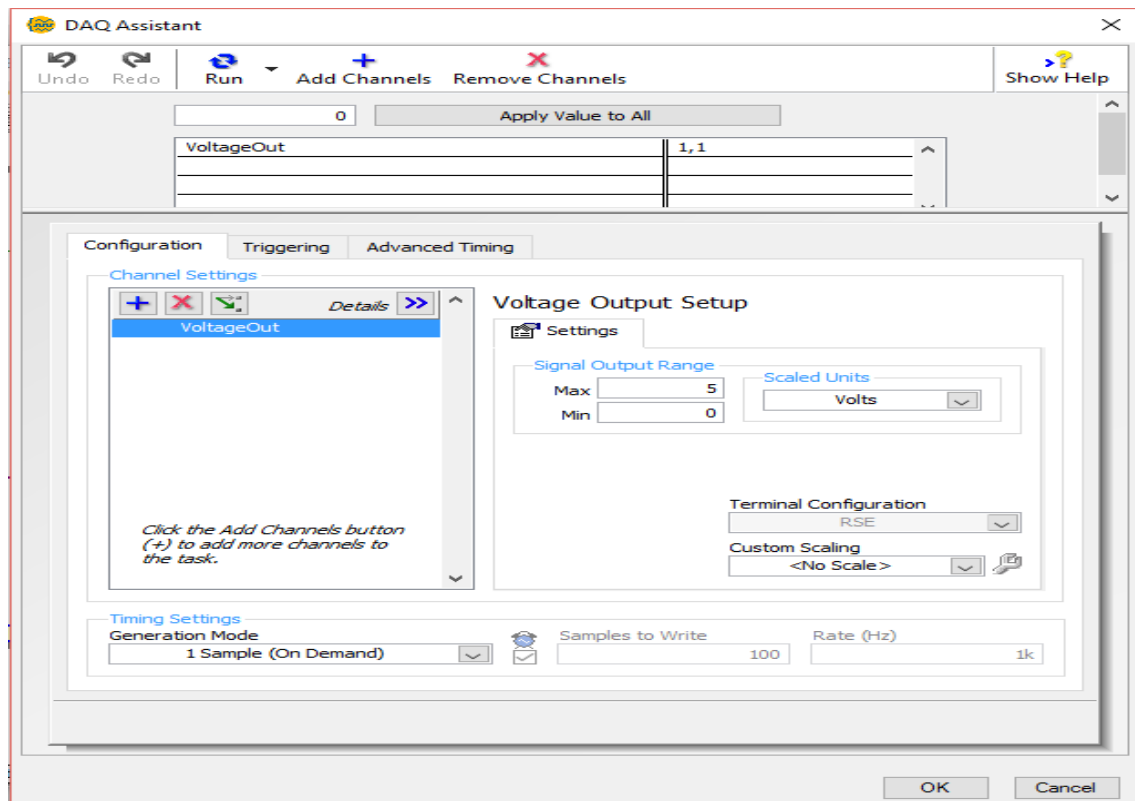
### Front Panel con el *switch* en modo ON



### Block Diagram



### Analog Output

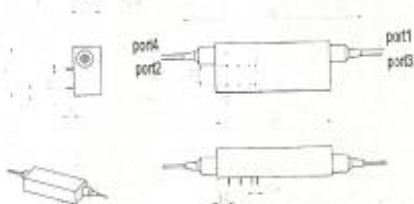


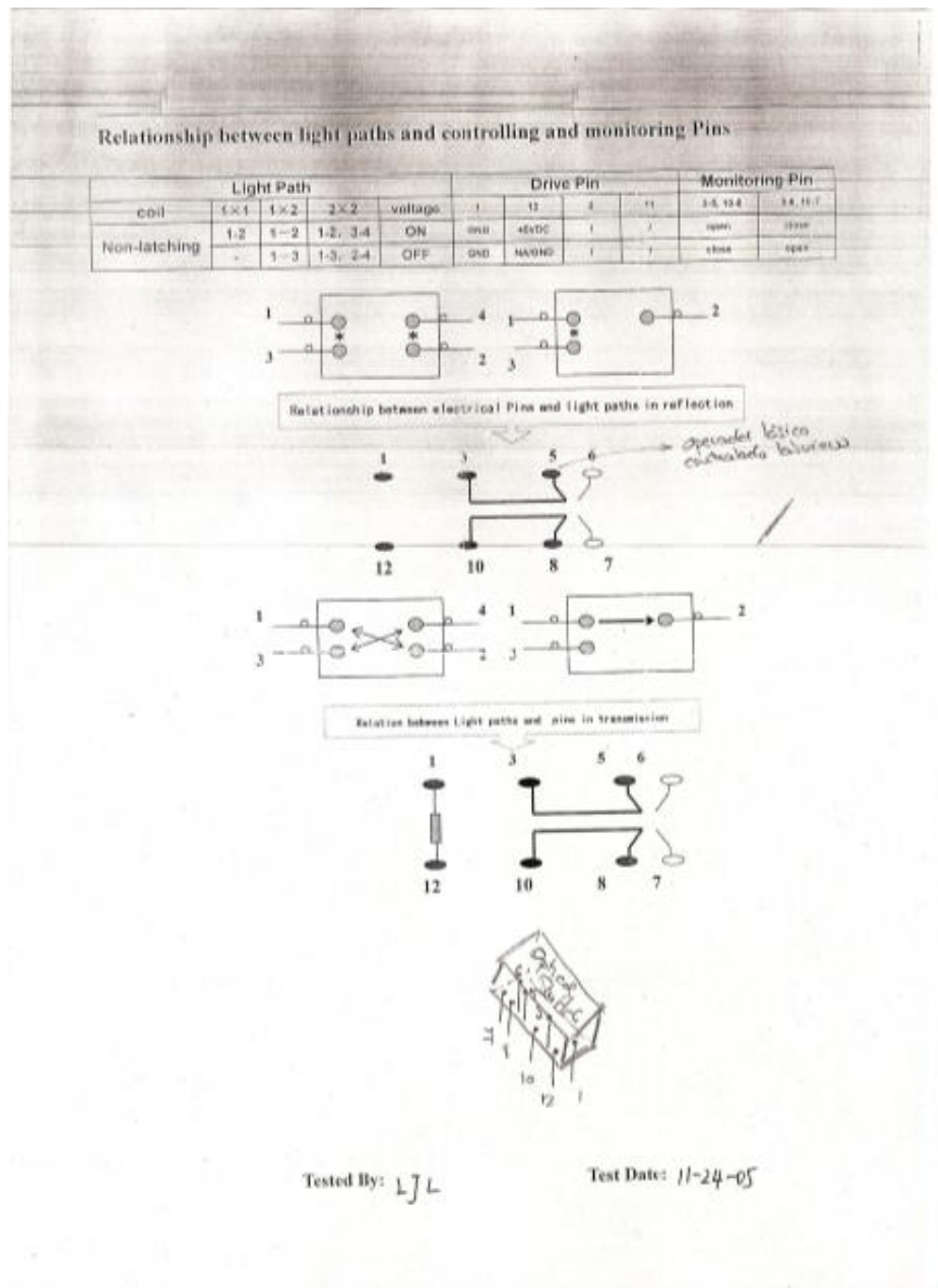




### Anexo III. Hojas de características


#### Switch óptico 1X2 OSW-22-135-09-1-N-S-FC/APC

Test Data					
Name:	Optical Switch				
P/N :	OSW-12-135-09-1-N-S-FC/APC				
S/N :	03C0511-335				
Specifications					
Wavelength	1310		1550		nm
Optical Path	1-2	1-3	1-2	1-3	
Insertion Loss	0.57	0.55	0.51	0.55	dB
Polarization Dependent Loss	<0.1				dB
Return Loss	≥50				dB
Crosstalk	≤-65				dB
Repeatability	±0.05				dB
Switch Time	5-10				ms
Operating Temperature	0-70				°C
Storage Temperature	-40-85				°C
Voltage	+5				V DC
Drive Current	50				mA
Power	<500				mW
Package Information					
					
Tested By: L J L			Test Date: 11-24-05		





## Regulador LM317



May 1995

### LM117/LM317A/LM317

## 3-Terminal Adjustable Regulator

### General Description

The LM117 series of adjustable 3-terminal positive voltage regulators is capable of supplying in excess of 1.5A over a 1.2V to 37V output range. They are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, both line and load regulation are better than standard fixed regulators. Also, the LM117 is packaged in standard transistor packages which are easily mounted and handled.

In addition to higher performance than fixed regulators, the LM117 series offers full overload protection available only in IC's. Included on the chip are current limit, thermal overload protection and safe area protection. All overload protection circuitry remains fully functional even if the adjustment terminal is disconnected.

Normally, no capacitors are needed unless the device is situated more than 6 inches from the input filter capacitors in which case an input bypass is needed. An optional output capacitor can be added to improve transient response. The adjustment terminal can be bypassed to achieve very high ripple rejection ratios which are difficult to achieve with standard 3-terminal regulators.

Besides replacing fixed regulators, the LM117 is useful in a wide variety of other applications. Since the regulator is "floating" and sees only the input-to-output differential voltage, supplies of several hundred volts can be regulated as long as the maximum input to output differential is not exceeded, i.e., avoid short-circuiting the output.

Also, it makes an especially simple adjustable switching regulator, a programmable output regulator, or by connecting a fixed resistor between the adjustment pin and output, the LM117 can be used as a precision current regulator. Supplies with electronic shutdown can be achieved by clamping

the adjustment terminal to ground which programs the output to 1.2V where most loads draw little current.

For applications requiring greater output current, see LM150 series (3A) and LM138 series (5A) data sheets. For the negative complement, see LM137 series data sheet.

#### LM117 Series Packages and Power Capability

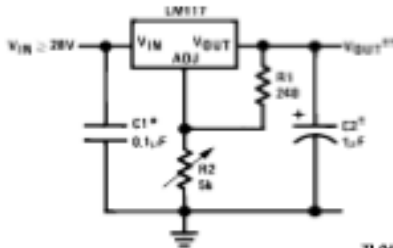
Part Number Suffix	Package	Rated Power Dissipation	Design Load Current
K	TO-3	20W	1.5A
H	TO-39	2W	0.5A
T	TO-220	20W	1.5A
E	LCC	2W	0.5A
S	TO-263	4W	1.5A

### Features

- Guaranteed 1% output voltage tolerance (LM317A)
- Guaranteed max. 0.01%/V line regulation (LM317A)
- Guaranteed max. 0.3% load regulation (LM117)
- Guaranteed 1.5A output current
- Adjustable output down to 1.2V
- Current limit constant with temperature
- P+ Product Enhancement tested
- 80 dB ripple rejection
- Output is short-circuit protected

### Typical Applications

#### 1.2V-25V Adjustable Regulator



TL117/0003-1

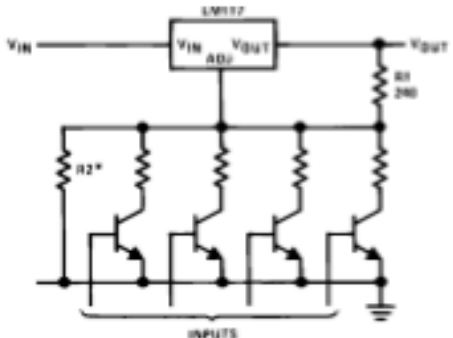
Full output current not available at high input-output voltages.

\*Needed if device is more than 6 inches from filter capacitors.

†Optional—improves transient response. Output capacitors in the range of 1  $\mu$ F to 1000  $\mu$ F of aluminum or tantalum electrolytic are commonly used to provide improved output impedance and rejection of transients.

$$V_{OUT} = 1.25V \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2$$

#### Digitally Selected Outputs



TL117/0003-2

\*Sets maximum  $V_{OUT}$

© 1995 National Semiconductor Corporation TL117/0003

DS0-030A067/Revised 4-01, U.S.A.

<http://www.national.com>

LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator



### Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications. (Note 2)

Power Dissipation	Internally Limited
Input-Output Voltage Differential	+40V, -0.3V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Load Temperature	
Metal Package (Soldering, 10 seconds)	300°C
Plastic Package (Soldering, 4 seconds)	260°C
ESD Tolerance (Note 5)	3 kV

### Operating Temperature Range

LM117	-55°C ≤ T <sub>J</sub> ≤ +150°C
LM317A	-40°C ≤ T <sub>J</sub> ≤ +125°C
LM317	0°C ≤ T <sub>J</sub> ≤ +125°C

### Preconditioning

Thermal Limit Burn-In	All Devices 100%
-----------------------	------------------

### Electrical Characteristics

Specifications with standard type face are for T<sub>J</sub> = 25°C, and those with boldface type apply over full Operating Temperature Range. Unless otherwise specified, V<sub>IN</sub> - V<sub>OUT</sub> = 5V, and I<sub>OUT</sub> = 10 mA. (Note 3)

Parameter	Conditions	LM117 (Note 2)			Units
		Min	Typ	Max	
Reference Voltage					V
	3V ≤ (V <sub>IN</sub> - V <sub>OUT</sub> ) ≤ 40V, 10 mA ≤ I <sub>OUT</sub> ≤ I <sub>MAX</sub> , P ≤ P <sub>MAX</sub>	<b>1.20</b>	<b>1.25</b>	<b>1.30</b>	V
Line Regulation	3V ≤ (V <sub>IN</sub> - V <sub>OUT</sub> ) ≤ 40V (Note 4)		0.01	0.02	%/V
			<b>0.02</b>	<b>0.05</b>	%/V
Load Regulation	10 mA ≤ I <sub>OUT</sub> ≤ I <sub>MAX</sub> (Note 4)		0.1	0.3	%
			<b>0.3</b>	<b>1</b>	%
Thermal Regulation	20 ms Pulse		0.03	0.07	%/W
Adjustment Pin Current			<b>50</b>	<b>100</b>	μA
Adjustment Pin Current Change	10 mA ≤ I <sub>OUT</sub> ≤ I <sub>MAX</sub> 3V ≤ (V <sub>IN</sub> - V <sub>OUT</sub> ) ≤ 40V		<b>0.2</b>	<b>5</b>	μA
Temperature Stability	T <sub>MIN</sub> ≤ T <sub>J</sub> ≤ T <sub>MAX</sub>		<b>1</b>		%
Minimum Load Current	(V <sub>IN</sub> - V <sub>OUT</sub> ) = 40V		<b>3.5</b>	<b>5</b>	mA
Current Limit	(V <sub>IN</sub> - V <sub>OUT</sub> ) ≤ 15V				
	K Package	<b>1.5</b>	<b>2.2</b>	<b>3.4</b>	A
	H, K Packages	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>1.8</b>	A
	(V <sub>IN</sub> - V <sub>OUT</sub> ) = 40V				
	K Package	0.3	0.4		A
	H, K Packages	0.15	0.2		A
RMS Output Noise, % of V <sub>OUT</sub>	10 Hz ≤ f ≤ 10 kHz		0.003		%
Ripple Rejection Ratio	V <sub>OUT</sub> = 10V, f = 120 Hz, C <sub>ADJ</sub> = 0 μF		<b>65</b>		dB
	V <sub>OUT</sub> = 10V, f = 120 Hz, C <sub>ADJ</sub> = 10 μF	<b>66</b>	<b>80</b>		dB
Long-Term Stability	T <sub>J</sub> = 125°C, 1000 hrs		0.3	1	%
Thermal Resistance, Junction-to-Case	K Package		2.3	3	°C/W
	H Package		12	15	°C/W
	E Package				°C/W
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient (No Heat Sink)	K Package		35		°C/W
	H Package		140		°C/W
	E Package				°C/W



<b>Electrical Characteristics</b> (Continued)								
Specifications with standard type face are for $T_J = 25^\circ\text{C}$ , and those with boldface type apply over full Operating Temperature Range. Unless otherwise specified, $V_{IN} - V_{OUT} = 5\text{V}$ , and $I_{OUT} = 10\text{ mA}$ . (Note 3)								
Parameter	Conditions	LM317A			LM317			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Reference Voltage		1.238	1.250	1.262				V
	$3\text{V} < (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$ , $10\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ , $P \leq P_{MAX}$	<b>1.225</b>	<b>1.250</b>	<b>1.270</b>	<b>1.20</b>	<b>1.25</b>	<b>1.30</b>	V
Line Regulation	$3\text{V} < (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$ (Note 4)		0.005	0.01		0.01	0.04	%/V
			<b>0.01</b>	<b>0.02</b>		<b>0.02</b>	<b>0.07</b>	%/V
Load Regulation	$10\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ (Note 4)		0.1	0.5		0.1	0.5	%
			<b>0.3</b>	<b>1</b>		<b>0.3</b>	<b>1.5</b>	%
Thermal Regulation	20 ms Pulse		0.04	0.07		0.04	0.07	%/W
Adjustment Pin Current			<b>50</b>	<b>100</b>		<b>50</b>	<b>100</b>	$\mu\text{A}$
Adjustment Pin Current Change	$10\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ , $3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$		<b>0.2</b>	<b>5</b>		<b>0.2</b>	<b>5</b>	$\mu\text{A}$
Temperature Stability	$T_{MIN} \leq T_J \leq T_{MAX}$		<b>1</b>			<b>1</b>		%
Minimum Load Current	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40\text{V}$		<b>3.5</b>	<b>10</b>		<b>3.5</b>	<b>10</b>	mA
Current Limit	$(V_{IN} - V_{OUT}) \leq 15\text{V}$ K, T Packages	<b>1.5</b>	<b>2.2</b>	<b>3.4</b>	<b>1.5</b>	<b>2.2</b>	<b>3.4</b>	A
	H, P Packages	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>1.8</b>	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>1.8</b>	A
	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40\text{V}$ K, T Packages	0.15	0.4		0.15	0.4		A
	H, P Packages	0.075	0.2		0.075	0.2		A
RMS Output Noise, % of $V_{OUT}$	$10\text{ Hz} \leq f \leq 10\text{ kHz}$		0.003			0.003		%
Ripple Rejection Ratio	$V_{OUT} = 10\text{V}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $C_{ADJ} = 0\text{ }\mu\text{F}$		<b>65</b>			<b>65</b>		dB
	$V_{OUT} = 10\text{V}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $C_{ADJ} = 10\text{ }\mu\text{F}$	<b>66</b>	<b>80</b>		<b>66</b>	<b>80</b>		dB
Long-Term Stability	$T_J = 125^\circ\text{C}$ , 1000 hrs		0.3	1		0.3	1	%
Thermal Resistance, Junction-to-Case	K Package					2.3	3	$^\circ\text{C/W}$
	H Package		12	15		12	15	$^\circ\text{C/W}$
	T Package		4	5		4		$^\circ\text{C/W}$
	P Package							$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient (No Heat Sink)	K Package		35			35		$^\circ\text{C/W}$
	H Package		140			140		$^\circ\text{C/W}$
	T Package		50			50		$^\circ\text{C/W}$
	P Package (Note 6)					50		$^\circ\text{C/W}$

**Note 1:** Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not guarantee specific performance limits. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics. The guaranteed specifications apply only for the test conditions listed.

**Note 2:** Refer to RETS117H drawing for the LM117H, or the RETS117K for the LM117K military specifications.

**Note 3:** Although power dissipation is internally limited, these specifications are applicable for maximum power dissipations of 2W for the TO-33 and 20W for the TO-3 and TO-220.  $I_{MAX}$  is 1.5A for the TO-3 and TO-220 packages and 0.5A for the TO-33 package. All limits (i.e., the numbers in the Min. and Max. columns) are guaranteed to National's AOQL (Average Outgoing Quality Level).

**Note 4:** Regulation is measured at a constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects are covered under the specifications for thermal regulation.

**Note 5:** Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 k $\Omega$  resistor.

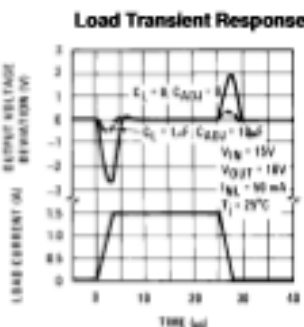
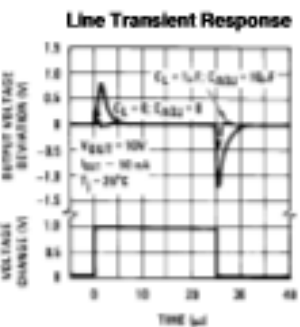
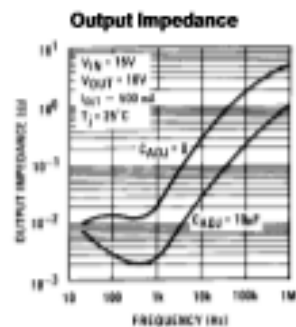
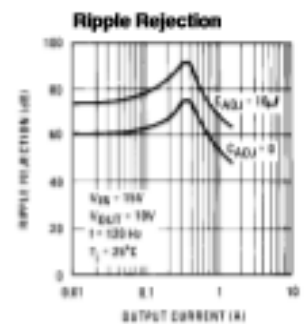
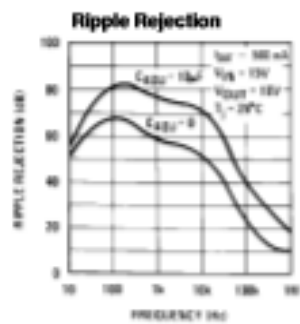
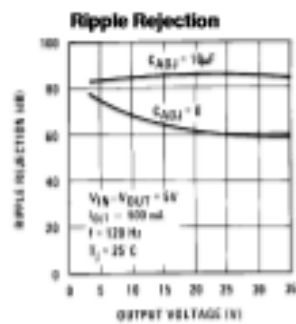
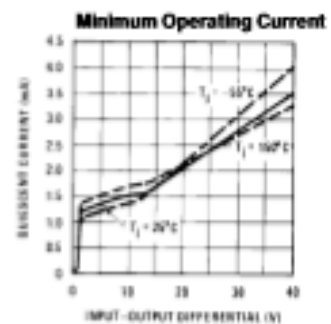
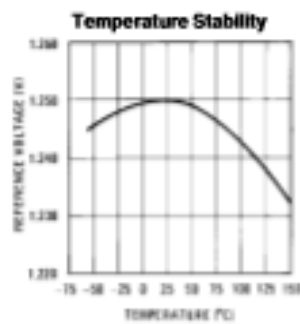
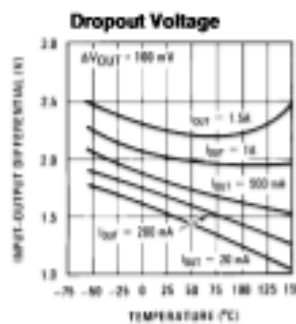
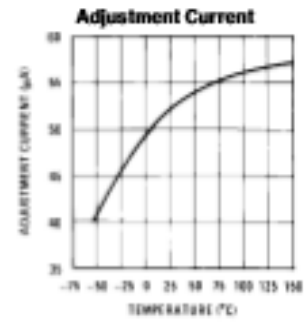
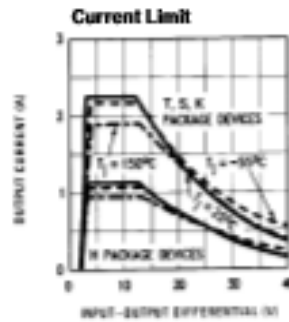
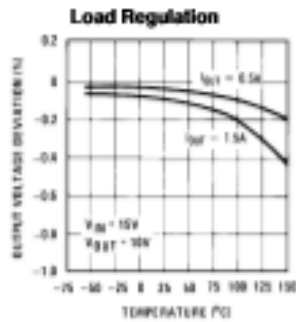
**Note 6:** If the TO-263 package is used, the thermal resistance can be reduced by increasing the PC board copper area thermally connected to the package: Using 0.5 square inches of copper area,  $\theta_{JA}$  is 90 $^\circ\text{C/W}$ ; with 1 square inch of copper area,  $\theta_{JA}$  is 37 $^\circ\text{C/W}$ ; and with 1.8 or more square inches of copper area,  $\theta_{JA}$  is 32 $^\circ\text{C/W}$ .





## Typical Performance Characteristics

Output Capacitor = 0  $\mu$ F unless otherwise noted

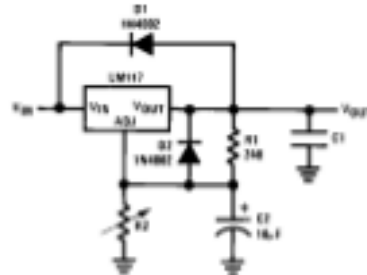


TL/HUMBLE-4

### Application Hints (Continued)

The bypass capacitor on the adjustment terminal can discharge through a low current junction. Discharge occurs when either the input or output is shorted. Internal to the LM117 is a 50Ω resistor which limits the peak discharge

current. No protection is needed for output voltages of 25V or less and 10 μF capacitance. Figure 3 shows an LM117 with protection diodes included for use with outputs greater than 25V and high values of output capacitance.



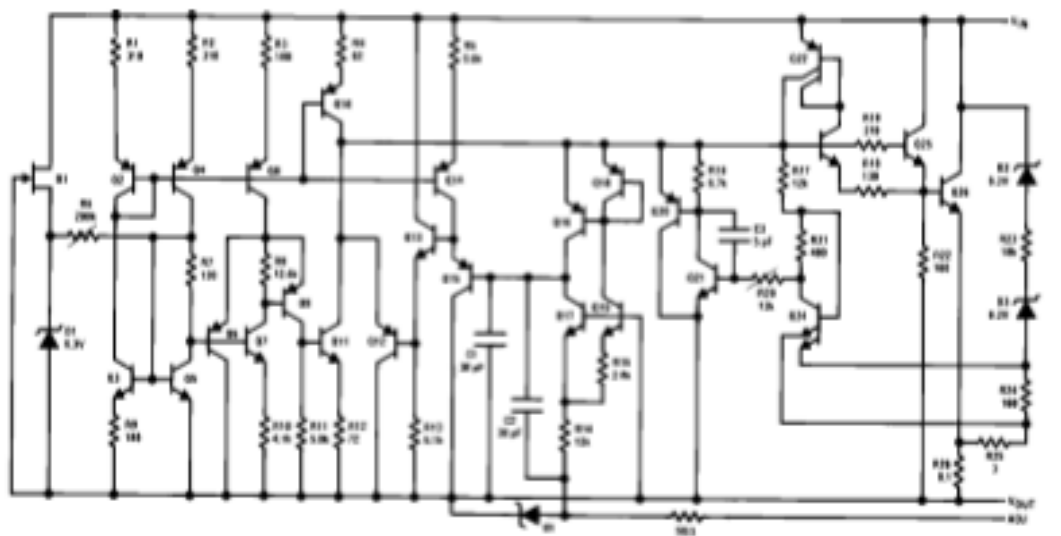
$$V_{OUT} = 1.25V \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ}R2$$

D1 protects against C1  
D2 protects against C2

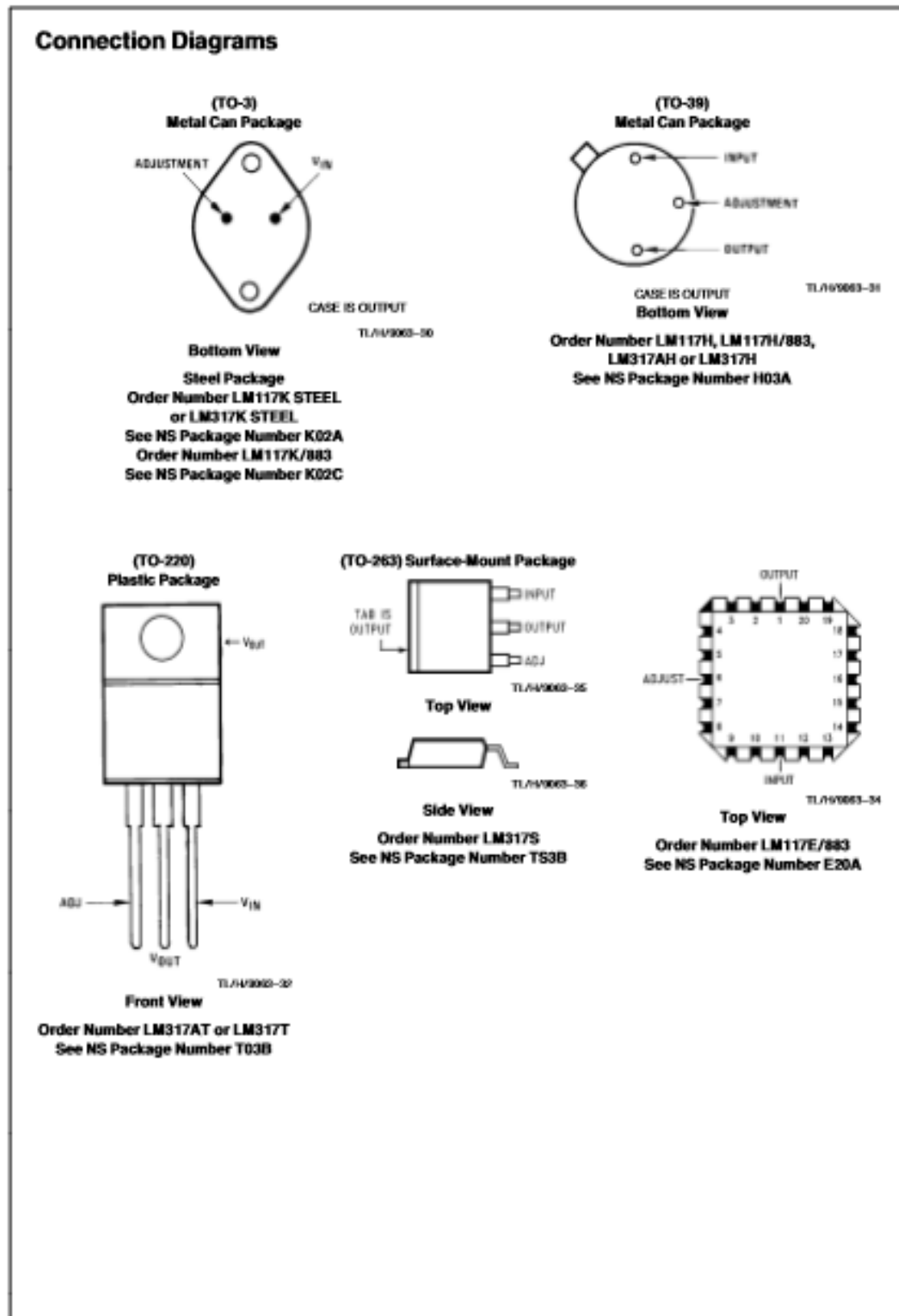
TL111/0003-7

FIGURE 3. Regulator with Protection Diodes

### Schematic Diagram



TL111/0003-8





## Relay G5V-1

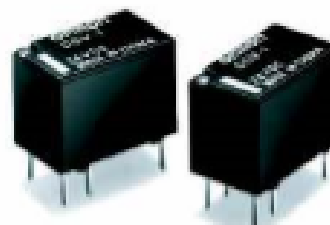
# OMRON

## PCB Relay

## G5V-1

### Ultra-miniature, Highly Sensitive SPDT Relay for Signal Circuits

- Ultra-miniature at 12.5 x 7.5 x 10 mm (L x W x H).
- Wide switching power of 1 mA to 1 A.
- High sensitivity: 150-mW nominal coil power.
- Fully sealed construction.
- International 2.54-mm terminal pitch.
- Conforms to FCC Part 68 requirements for coil to contacts.



RoHS Compliant Refer to pages 16 to 17 for details.



## Ordering Information

Classification				Model
Contact form	Contact type	Contact material	Structure	
SPDT	Single crossover	Ag + Au-Alloy	Fully sealed	G5V-1

Note: When ordering, add the rated coil voltage to the model number.  
Example: G5V-1 12 VDC

Rated coil voltage

### Model Number Legend

G5V - ☐ ☐ VDC

1 2

1. Contact Form  
1: SPDT

2. Rated Coil Voltage  
3, 5, 6, 9, 12, 24 VDC

## Specifications

### ■ Coil Ratings

Rated voltage	3 VDC	5 VDC	6 VDC	9 VDC	12 VDC	24 VDC
Rated current	50 mA	30 mA	25 mA	16.7 mA	12.5 mA	6.25 mA
Coil resistance	60 Ω	167 Ω	240 Ω	540 Ω	960 Ω	3,840 Ω
Coil inductance (H) (ref. value)	Armature OFF	0.05	0.15	0.20	0.45	0.85
	Armature ON	0.11	0.29	0.41	0.93	1.63
Min. operate voltage	80% max. of rated voltage					
Min. release voltage	10% min. of rated voltage					
Max. voltage	200% of rated voltage at 23°C					
Power consumption	Approx. 150 mW					

Note: 1. The rated current and coil resistance are measured at a coil temperature of 23°C with a tolerance of ±10%.  
2. Operating characteristics are measured at a coil temperature of 23°C.  
3. The maximum voltage is the highest voltage that can be imposed on the relay coil.



G5V-1 ————— OMRON ————— G5V-1

## ■ Contact Ratings

Load	Resistive load ( $\cos\phi = 1$ )
Rated load	0.5 A at 125 VAC, 1 A at 24 VDC
Contact material	Ag-Cu Alloy
Rated carry current	2 A
Max. switching voltage	125 VAC, 60 VDC
Max. switching current	1 A
Max. switching power	62.5 VA, 30 W
Failure rate (reference value) (See note.)	1 mA at 5 VDC

Note: P level:  $\lambda_{CO} = 0.1 \times 10^{-6}$  operations

This value was measured at a switching frequency of 120 operations/min and the criterion of contact resistance is 100  $\Omega$ . This value may vary depending on the operating environment. Always double-check relay suitability under actual operating conditions.

## ■ Characteristics

Contact resistance (See note 1.)	100 m $\Omega$ max.
Operate time (See note 2.)	5 ms max. (approx. 2.5 ms)
Release time (See note 2.)	5 ms max. (approx. 0.9 ms)
Max. operating frequency	Mechanical: 30,000 operations/hr Electrical: 1,000 operations/hr (under rated load)
Insulation resistance (See note 2.)	1,000 M $\Omega$ min. (at 500 VDC between coil and contacts, at 250 VDC between contacts of same polarity)
Dielectric strength	1,000 VAC, 50/60 Hz for 1 min between coil and contacts 400 VAC, 50/60 Hz for 1 min between contacts of same polarity
Impulse withstand voltage	1,500 V (10 x 100 $\mu$ s) between coil and contacts (conforms to IEC Part 6B)
Vibration resistance	Destruction: 10 to 55 to 10 Hz, 1.65-mm single amplitude (3.3-mm double amplitude) Malfunction: 10 to 55 to 10 Hz, 1.65-mm single amplitude (3.3-mm double amplitude)
Shock resistance	Destruction: 1,000 m/s <sup>2</sup> Malfunction: 500 m/s <sup>2</sup>
Endurance	Mechanical: 5,000,000 operations min. (at 10,000 operations/hr) Electrical: 100,000 operations min. (under rated load, at 1,000 operations/hr)
Ambient temperature	Operating: -40°C to 70°C (with no icing)
Ambient humidity	Operating: 5% to 85%
Weight	Approx. 2 g

Note: The values here are initial values.

Note: 1. The contact resistance was measured with 10 mA at 1 VDC with a voltage drop method.

2. Values in parentheses are actual values.

3. The insulation resistance was measured with a 500-VDC megohmmeter between coil and contacts and a 250-VDC megohmmeter between contacts with the same polarity applied to the same parts as those used for checking the dielectric strength.

## ■ Approved Standards

UL1950 (File No. E41515)/CSA C22.2 No.0, No.14 (File No. LR31028)

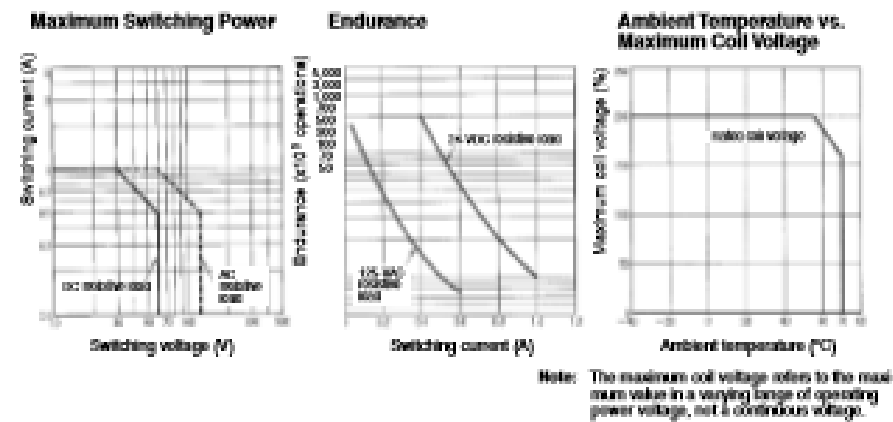
Model	Contact form	Coil ratings	Contact ratings
G5V-1	SPDT	3 to 24 VDC	0.5 A, 125 VAC (general use) 0.5 A, 110 VDC (resistive load) 1 A, 30 VDC (resistive load)

G5V-1


OMRON

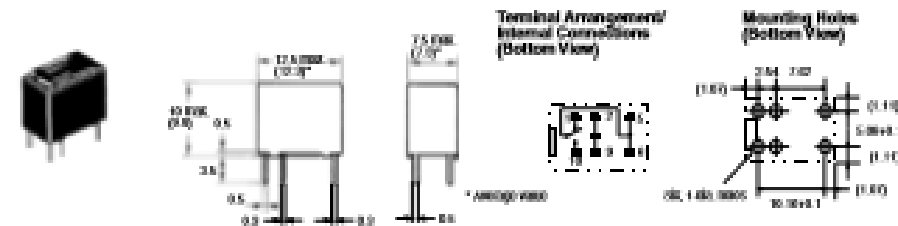
G5V-1

## Engineering Data



## Dimensions

- Note:**
1. All units are in millimeters unless otherwise indicated.
  2. Numbers in parentheses are reference values.
  3. Tolerance: ±0.1
  4. Orientation marks are indicated as follows: 



## Precautions

### Long-term Continuously ON Contacts

Using the Relay in a circuit where the Relay will be ON continuously for long periods (without switching) can lead to unstable contacts, because the heat generated by the coil itself will affect the insulation, causing a film to develop on the contact surfaces. Be sure to use a fail-safe circuit design that provides protection against contact failure or coil burnout.

### Relay Handling

When washing the product after soldering the Relay to a PCB, use a water-based solvent or alcohol-based solvent, and keep the solvent temperature to less than 40°C. Do not put the Relay in a cold cleaning bath immediately after soldering.

**ALL DIMENSIONS SHOWN ARE IN MILLIMETERS.**  
To convert millimeters into inches, multiply by 0.03937. To convert grams into ounces, multiply by 0.03527.

Cat. No. K048-E1-02

## DAQ NI USB-6009



Ventas  
España  
91 640 0088  
ni.spain@ni.com

### USB-6009

#### Dispositivo DAQ Multifunción de Bajo Costo de 14 Bits, 48 kS/s

- 5 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 E/S digitales; contador de 32 bits
- Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- La versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW®, LabWindows™/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET



### Información General

El NI USB-6009 brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas. Para usuarios de Mac OS X y Linux, descargue el software NI-DAQmx Base y programe el USB-6009 con NI LabVIEW o C.

Para cursos complementarios con experimentos prácticos sobre teoría de simulación, medida y automatización, NI desarrolló un Kit de Estudiante USB-6009 que incluye una copia de LabVIEW Solución de Estudiante. Estos paquetes son exclusivamente para estudiantes, proporcionándoles una herramienta de aprendizaje potente, práctica y a bajo costo. Consulte la sección de Recursos para obtener más información.

Para un muestreo más rápido, medidas más precisas, soporte para calibración y mayor número de canales, considere los dispositivos DAQ USB de alto rendimiento NI USB-6210 y NI USB-6211.

Los módulos DAQ USB son compatibles con las siguientes versiones (o posteriores) de software de aplicación de NI: LabVIEW 7.x, LabWindows/CVI 7.x o Measurement Studio 7.x. Los módulos DAQ USB también son compatibles con Visual Studio .NET, C/C++ y Visual Basic 6.0.

The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries.

### Especificaciones

#### Documentos con Especificaciones

- Especificaciones (2)
- Hoja de Especificaciones

#### Resumen de Especificaciones

<b>General</b>	
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Tipo de Medida	Voltaje
Form Factor	USB
Sistema Operativo / Objetivo	Linux Mac OS



	Pocket PC Windows
Compatible con MathS	Si
Tipo de Alimentación	None
Entrada Analógica	
Canales de una sola terminal	8
Canales Diferenciales	4
Resolución de Entrada Analógica	14 bits
Rango de Voltaje Máximo	
Rango	-10 V - 10 V
Precisión	7.75 mV
Rango de Voltaje Mínimo	
Rango	-1 V - 1 V
Precisión	1.53 mV
Número de Rangos	8
Muestreo Simultáneo	No

## Simultaneous Sampling

A property of a measurement system in which each input or output channel is digitized or updated at the same instant. You will need simultaneous sampling for applications where the time relationship between inputs is important, such as phase analysis of AC signals.

Because channel-dedicated analog-to-digital converters (ADCs) are used to sample data simultaneously between inputs, the maximum sample rate is applicable to each channel and is not divided by the total number of channels. Devices that don't have simultaneous sampling capabilities use multiplexing to connect each channel to its ADC.

Interleaved scanning is a low-cost option to simulate simultaneous sampling for low-frequency signals such as temperature or pressure. This method scans the input channels at one interval and uses a second interval to determine the time before repeating the scan. The input channels are scanned within microseconds, creating the effect of simultaneously sampling the input channels.

Memoria Interna	512 B
Salida Analógica	
Número de Canales	2
Resolución	12 bits



Rango de Voltaje Máximo	
Rango	0 V - 5 V
Precisión	1 mV
Rango de Voltaje Mínimo	
Rango	0 V - 5 V
Precisión	1 mV
Razón de Actualización	150 S / s
Capacidad de Corriente Simple	5 mA
Capacidad de Corriente Total	10 mA
E / S Digital	
Canales Bidireccionales	12
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Temporización	Software
Niveles Lógicos	TTL
Filtros de Entrada Programables	No
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	No
Entrada Digital	
Tipo de Entrada	Sinking Sourcing
Rango de Voltaje Máximo	0 V - 5 V
Salida Digital	
Tipo de Salida	Sinking Sourcing

### Current Flow

A **sinking** device provides a path for the current to ground and is not responsible for powering the device. Terms used to describe sinking devices include NPN, Open Collector, Normally High, and IEC Negative Logic.

A **sourcing** device provides the power or a positive potential. Sourcing devices "push" the current through the load. Terms used to describe sourcing devices include PNP, Open Emitter, Normally Low, and IEC Positive Logic.

**Relays** are classified by their number of poles and number of throws. The pole of a relay is the terminal common to every path.

Each position that the pole can connect to is called a throw. A relay can be made of  $n$  poles and  $m$  throws. For example, a single-pole single-throw relay (SPST) has one pole and one throw.

- Form A relays are SPST with a default state of normally open.
- Form B relays are SPST with a default state of normally closed.
- Form C relays are SPDT and break the connection with one throw before making contact with the other (break-before-make)...

Capacidad de Corriente Simple	3.5 mA
Capacidad de Corriente Total	102 mA
Rango de Voltaje Máximo	0 V - 5 V
Contadores / Temporizadores	
Temporizador Watchdog	No

## Digital I/O Watchdogs

NI digital I/O watchdogs are an innovative technology that provides protection against a wide variety of fault conditions:

- Computer crash - total OS crash
- Application crash - software application ceases to respond
- Driver crash - device driver ceases to respond
- PCI bus failure - communications cease to respond

With watchdogs, the digital outputs go to a safe state when a fault condition is detected and the watchdog timer expires for safe recovery. Watchdogs are important whenever the module is connected to actuators such as pumps, valves, motors, and relays. The digital I/O module monitors the software application and, if it fails to respond within the time limit, automatically sets the output lines to a user-defined safe state. The module remains in the watchdog state until the watchdog timer is disarmed by the application and new I/O values are written, the device is reset, or the computer is restarted.

Contadores	1
Operaciones a 50/er	No
Debouncing / Glitch Removal	No
Frecuencia Mác. de la Fuente	5 MHz
Generación de Pulso	No
Tamaño	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	TTL
Temporización / Clapero / Sincronización	



## Análisis de técnicas de monitorización en redes ópticas pasivas (PON) y desarrollos en la monitorización con radiofrecuencia en redes WDM-PON

Diapera	Digital
Bus de Sincronización (MTS)	No
Especificaciones Físicas	
Longitud	0.51 cm
Ancho	0.15 cm
Altura	2.31 cm
Conector de E/F	Terminales de familia
Potencia USB	Energizado por Bus



## Transistor 2N2222A



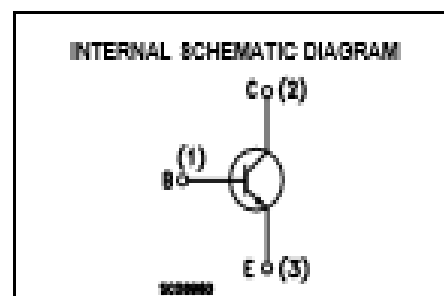
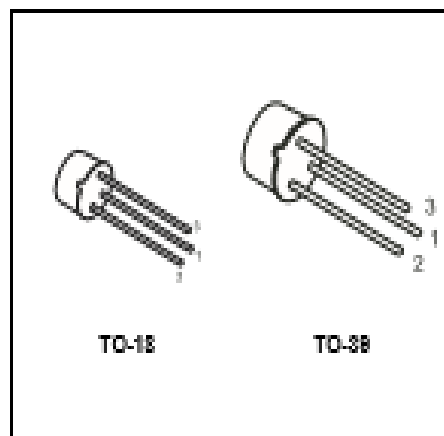
**2N2219A**  
**2N2222A**

### HIGH SPEED SWITCHES

PRELIMINARY DATA

#### DESCRIPTION

The 2N2219A and 2N2222A are silicon Planar Epitaxial NPN transistors in Jeduc TO-38 (for 2N2219A) and in Jeduc TO-18 (for 2N2222A) metal case. They are designed for high speed switching application at collector current up to 500mA, and feature useful current gain over a wide range of collector current, low leakage currents and low saturation voltage.



#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{CE0}$	Collector-Base Voltage ( $I_B = 0$ )	75	V
$V_{CE0}$	Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )	40	V
$V_{EB0}$	Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )	6	V
$I_C$	Collector Current	0.6	A
$I_{CM}$	Collector Peak Current ( $t_B = 5$ ms)	0.8	A
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_{amb} = 25$ °C		
	for 2N2219A	0.8	W
	for 2N2222A	0.6	W
	at $T_C \leq 25$ °C		
	for 2N2219A	3	W
	for 2N2222A	1.8	W
$T_{stg}$	Storage Temperature	-65 to 175	°C
$T_J$	Max. Operating Junction Temperature	175	°C

February 2008

1/7



## 2N2219A / 2N2222A

### THERMAL DATA

		1Q-39	1Q-18	
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance Junction-Ambient	50	88.9	$^{\circ}\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance Junction-Ambient	187.5	300	$^{\circ}\text{C/W}$

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{\text{case}} = 25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_{CBO}$	Collector Cut-off Current ( $I_B = 0$ )	$V_{CE} = 60\text{ V}$ $V_{CE} = 60\text{ V}$ $T_J = 150^{\circ}\text{C}$			10 10	nA $\mu\text{A}$
$I_{CIS}$	Collector Cut-off Current ( $V_{BE} = -3\text{V}$ )	$V_{CE} = 60\text{ V}$			10	nA
$I_{BES}$	Base Cut-off Current ( $V_{BE} = -3\text{V}$ )	$V_{CE} = 60\text{ V}$			20	nA
$I_{EEO}$	Emitter Cut-off Current ( $I_C = 0$ )	$V_{BE} = 3\text{ V}$			10	nA
$V_{BRCBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage ( $I_E = 0$ )	$I_C = 10\text{ }\mu\text{A}$	75			V
$V_{BRECBO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage ( $I_E = 0$ )	$I_C = 10\text{ mA}$	40			V
$V_{BERBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage ( $I_C = 0$ )	$I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$	6			V
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 150\text{ mA}$ $I_B = 15\text{ mA}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $I_B = 50\text{ mA}$			0.3 1	V V
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 150\text{ mA}$ $I_B = 15\text{ mA}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $I_B = 50\text{ mA}$	0.6		1.2 2	V V
$h_{FE}$	DC Current Gain	$I_C = 0.1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $T_{\text{amb}} = -55^{\circ}\text{C}$	35 50 75 100 40 50 35		300	
$h_{FE}$	Small Signal Current Gain	$I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{ KHz}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{ KHz}$	50 75		300 375	
$f_T$	Transition Frequency	$I_C = 20\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 100\text{ MHz}$		300		MHz
$C_{EBO}$	Emitter-Base Capacitance	$I_C = 0$ $V_{BE} = 0.5\text{ V}$ $f = 100\text{ KHz}$			25	pF
$C_{CBO}$	Collector-Base Capacitance	$I_E = 0$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 100\text{ KHz}$			8	pF
$R_{\text{input}}$	Real Part of Input Impedance	$I_C = 20\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 300\text{ MHz}$			60	$\Omega$

\* Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu\text{s}$ , duty cycle = 1 %



2N2219A / 2N2222A

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)**

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
NF	Noise Figure	$I_C = 0.1 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$ $f = 1 \text{ kHz}$ $R_L = 1 \text{ k}\Omega$		4		dB
$h_{ie}$	Input Impedance	$I_C = 1 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$	2 0.25		8 1.25	k $\Omega$ k $\Omega$
$h_{re}$	Reverse Voltage Ratio	$I_C = 1 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$			8 4	$10^{-4}$ $10^{-4}$
$h_{oe}$	Output Admittance	$I_C = 1 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}$ $V_{CE} = 10 \text{ V}$	5 25		35 200	$\mu\text{S}$ $\mu\text{S}$
$t_{d+}$	Delay Time	$V_{CE} = 30 \text{ V}$ $I_C = 150 \text{ mA}$ $I_{B1} = 15 \text{ mA}$ $V_{BB} = -0.5 \text{ V}$			10	ns
$t_{r+}$	Rise Time	$V_{CE} = 30 \text{ V}$ $I_C = 150 \text{ mA}$ $I_{B1} = 15 \text{ mA}$ $V_{BB} = -0.5 \text{ V}$			25	ns
$t_{s+}$	Storage Time	$V_{CE} = 30 \text{ V}$ $I_C = 150 \text{ mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = 15 \text{ mA}$			325	ns
$t_{f+}$	Fall Time	$V_{CE} = 30 \text{ V}$ $I_C = 150 \text{ mA}$ $I_{B1} = -I_{B2} = 15 \text{ mA}$			60	ns
$f_{\text{var. Cons.}}$	Feedback Time Constant	$I_C = 20 \text{ mA}$ $V_{CE} = 20 \text{ V}$ $f = 31.8 \text{ MHz}$			150	ps

+ Pulsed; Pulse duration = 300  $\mu\text{s}$ ; Duty cycle  $\leq 1\%$

== See test circuit



## Power meter PM-1100

# PM-1100

POWER METER



40G  
100G

Pinpoint accuracy, wide dynamic range, high resolution and excellent linearity.

### KEY FEATURES

Excellent linearity of  $\pm 0.015$  dB

Power measurement up to 20 dBm with 2 mm GeX detector

Easy-to-use menu-driven display

### COMPLEMENTARY PRODUCTS



Variable Attenuator  
VA-3150

EXFO

SPEC SHEET

## ACCURATE, AUTOMATED MEASUREMENTS

The PM-1100 Power Meter delivers accurate power measurements over a wide dynamic range along with high resolution and excellent linearity. Choose the PM-1100 to automatically measure discrete values such as insertion loss or, alternately, for continuous monitoring and data acquisition. This stand-alone power meter provides exceptional performance, flexibility, user-friendliness and extensive integration capabilities.

### Ease of Use, Engineered

EXFO's PM-1100 was designed with the user in mind. A menu-driven interface guides you through the operation, displaying results clearly. Control your unit remotely with the GPIB and RS-232 interfaces and control codes from any compatible PC or test station.

### Excellent Specification

The PM-1100 Power Meter offers  $\pm 0.015$  dB linearity with a  $\pm 5$  % absolute uncertainty and a 0.001 dB power resolution. Whether you are measuring absolute or relative power levels, count on efficient, highly accurate measurements.

## PM-1100: FLEXIBLE AND EASY TO USE

### Key Applications

The PM-1100 power meter is ideal for the following applications:

- Absolute power measurement (dBm or W)
- Insertion loss measurement (dB or WW)
- Linearity verification
- System or subsystem monitoring
- Source stability measurement



- 1 **Clear results**  
Easy-to-read display with power measurements and wavelength selection
- 2 **Direct access to set up parameters**  
Perform scaling or adjust setup (power measurement units, reference, wavelength, gain, mode etc.) using the front panel
- 3 **Menu-driven interface**  
Easy control of advanced functions menu
- 4 **Interchangeable (fiber-optic adapters (FOA))**  
Different types of connectors may be used

**EXFO**



SPECIFICATIONS *	
Model	PM-1102X
Number of detectors	1
Detector type	GeX
Detector size (mm)	2
Wavelength range (nm)	750 to 1700
Power range (dBm)	20 to -75 *
Uncertainty (%)	±5 * (10 dBm to -35 dBm)
Linearity (dB) *	±0.015 (0 dBm to -35 dBm)
Noise (peak-to-peak)(pW) *	=
Power resolution (dB) *	0.001 (20 dBm to -35 dBm)
Wavelength resolution (nm)	1
Sampling rate (sample/s/channel) fast acquisition mode continuous measurement mode	up to 40
Fiber type (μm)	5/125 to 62.5/125
Analog output bandwidth <sup>d</sup> (Hz) (ranges 1 to 6) output voltage (V) output impedance (Ω)	N/A
External trigger	input voltage (V)
General Specifications	
Size (H x W x D)	117 mm x 222 mm x 333 mm (4 5/8 in x 8 3/4 in x 13 1/8 in)
Weight	2.0 kg (4.5 lb)
Temperature operating storage	0 °C to 40 °C (32 °F to 104 °F) -40 °C to 70 °C (-40 °F to 158 °F)
Relative humidity	0 % to 80 % non-condensing

**Notes**

- a. At 1310 nm (unless otherwise specified) with an FC/non-angled connector and a warm-up time of 20 minutes (30 minutes for PM-16X3W), followed by an offset nulling.
- b. From 0 °C to 30 °C.
- c. At 23 °C ± 1 °C with an FQA-322 connector adapter, between 1000 nm and 1650 nm. Add 1 % to uncertainty below 1000 nm and 3 % over 1650 nm.

- d. Averaged measurement at constant temperature in 0 °C to 40 °C range.
- e. Averaging time 0.25 s, observation time 50 s at 23 °C ± 1 °C, from 1200 nm to 1640 nm.
- f. Bandwidth corresponds to each electrical scale from the lowest to the highest gain.

## Anexo IV. Información utilizada del estándar G.698.3 de la ITU

Figure 5-1 shows a set of reference points that are defined in this Recommendation.

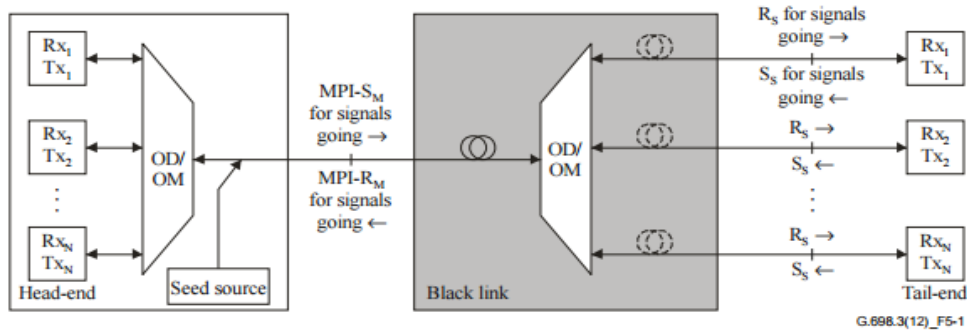


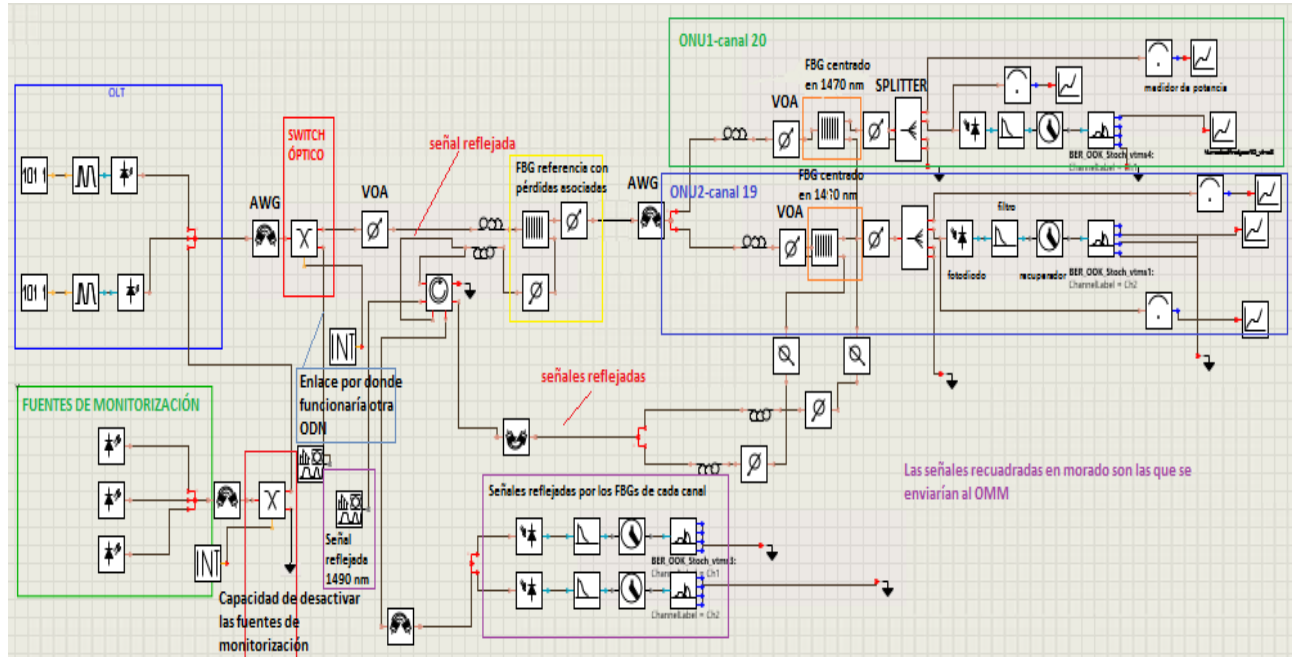
Figure 5-1 – Reference diagram

Table 8-1 – Physical layer parameters and values for class NRZ 1.25G, 97.15-GHz-spaced applications (head-end to tail-end)

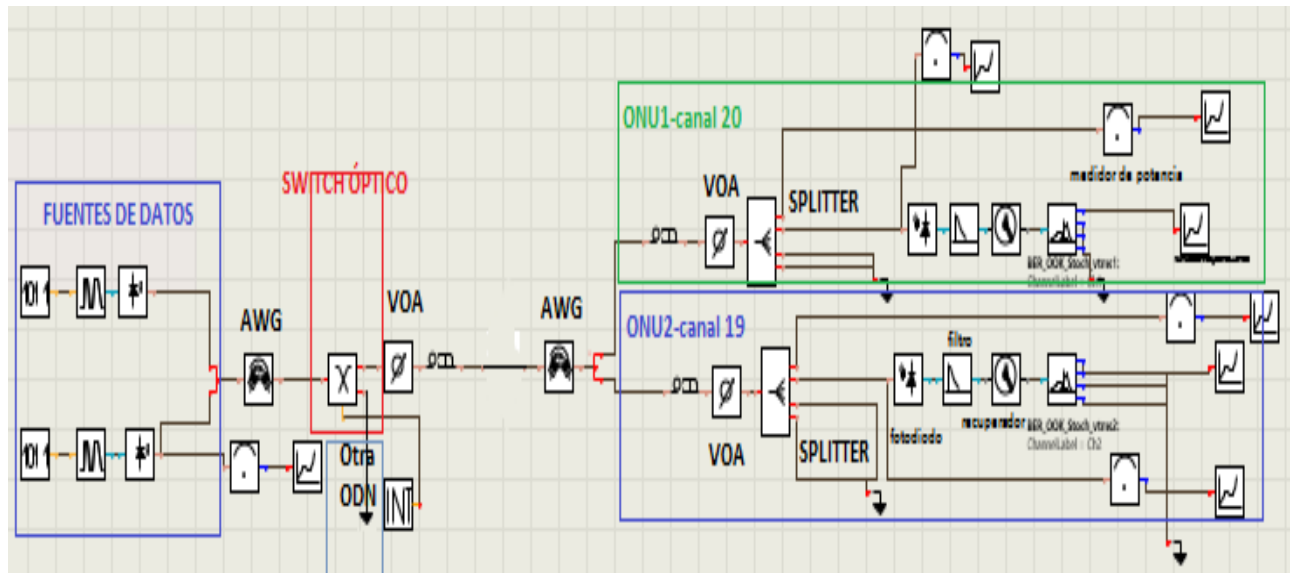
Parameter	Units	SD100S-0D2
<b>General information</b>		
Minimum channel spacing	GHz	97.15
Bit rate/line coding of optical tributary signals	–	NRZ 1.25G
Maximum bit-error ratio	–	$10^{-12}$
Fibre type	–	ITU-T G.652
<b>Interface at point MPI-S<sub>M</sub></b>		
Maximum mean channel output power	dBm	–7
Minimum mean channel output power	dBm	–13
Minimum central frequency	THz	186.143
Maximum central frequency	THz	190.70905
Maximum spectral excursion	GHz	±20
Minimum channel extinction ratio	dB	10
<b>Optical path from point MPI-S<sub>M</sub> to R<sub>S</sub></b>		
Maximum channel insertion loss	dB	14
Minimum channel insertion loss	dB	3
Maximum ripple	dB	2
Maximum chromatic dispersion	ps/nm	883
Minimum optical return loss at MPI-S <sub>M</sub>	dB	32
Maximum discrete reflectance between MPI-S <sub>M</sub> and R <sub>S</sub>	dB	–35
Maximum differential group delay	ps	NA
Maximum inter-channel crosstalk	dB	–15
<b>Interface at point R<sub>S</sub></b>		
Maximum mean channel input power	dBm	–10
Maximum mean channel seed signal input power	dBm	–2
Minimum mean channel seed signal input power	dBm	–18
Receiver sensitivity	dBm	–28
Maximum optical path penalty	dB	1
Maximum reflectance of receiver	dB	–27

## Anexo V. Esquemáticos y parámetros<sup>7</sup> principales de configuración de los dispositivos utilizados en la simulación en VPI

### Diseño de la red WDM-PON con la técnica de monitorización por auto-referencia en la simulación en VPI



### Diseño de la red WDM-PON sin la técnica de monitorización por auto-referencia en la simulación en VPI



<sup>7</sup> Si los parámetros de algunos dispositivos que no aparecen, significa que estos parámetros tienen el valor por defecto de VPI





## Parámetros de configuración de los dispositivos en la simulación de VPI

PRBS	
BitRate	12,5 Gbits/s
PRBS_Order	30
PreSpaces	1
PostSpaces	1

Tabla 1: Parámetros de configuración del generador de bits PRBS

AWG cíclico mux	
NumberOfInputPorts	5
NumberOfOutputPorts	1
ChannelFrequency	188,72 THz
ChannelSpacingInput	7,6 THz
FreeSpectralRange	10 THz
ModelType	Ideal
AdjustInsertionLosses	On
InsertionClearWindow	12,5 GHz
InsertionLoss	2,9 dB
InsertionLossUniformity	0,4 dB
NoiseDynamic	1 dB
NoiseResolution	12,5 Gbits/s/4
NoiseThreshold	-100 dB

Tabla 2: Parámetros de configuración del AWG cíclico que multiplexa las señales de datos y monitorización

UniversalFiberFwd	
NumberOfFiberSpans	1
Length	15 km o 1 km <sup>8</sup>
Attenuation	0,2 dB/km
Dispersion	16E-6 s/m <sup>2</sup>
DispersionSlope	0,08E3 s/m <sup>3</sup>
PMDCoefficient	0,1E-12/31,62 s/√m

Tabla 3: Parámetros de configuración de la fibra óptica

Attenuator VOA	
Pérdidas de inserción <sup>9</sup>	0,75 dB

Tabla 5: Pérdidas de inserción del atenuador

CoderDriver_OOK	
BitRate	12,5 Gbits/s
SampleRate	25 Gbits/s
ModulationType	NRZ
DutyCycle_NRZ	1
OutputLevel_0	0
OutputLevel_1	5
TransitionType	Gaussian
TransitionDefinition	10and90
TransitionTime_01	0,25/12,5 Gbits/s
TransitionTime_10	0,25/12,5 Gbits/s
RJ_Amplitude_RMS	0,05/12,5 Gbits/s
RJ_Limits_PP	0,5
DJ_Amplitude_PP	0
DJ_Frequency	0
NoiseSpectralDensity	10 <sup>-12</sup> A/√Hz
AddShotNoise	Off

Tabla 6: Parámetros de configuración del driver

Filter_FBG de referencia	
BraggResFreq	201,34 THz
Rejection	50 dB
Bandwidth	67,5 GHz
NoiseDynamic	1 dB
NoiseResolution	12,5 Gbits/s /4
NoiseThreshold	-100 dB

Tabla 7: Parámetros de configuración del FBG de referencia

CirculatorCwSys	
InsertionLoss	4,9 dB

Tabla 4: Parámetros de configuración del circulator

Splitter_1_4	
CoupleFactor1	0,01
CoupleFactor2	0,99

Tabla 9: Parámetros de configuración de los acopladores utilizados en el canal 19 y 20

<sup>8</sup> La longitud de la fibra óptica de alimentación es de 15 km y la longitud de las fibras de alimentación es de 1 km

<sup>9</sup> Las pérdidas de inserción del VOA tienen que ser añadidas a los valores de la atenuación, ya que VPI no incluye las pérdidas de inserción entre los parámetros configurables en estos dispositivos



AWG cíclico demux	
NumberOfInputPorts	1
NumberOfOutputPorts	2
ChannelFrequency	188,72 THz
ChannelSpacingOutput	0,09 THz
FreeSpectralRange	15,31 THz
ModelType	Ideal
AdjustInsertionLosses	On
InsertionClearWindow	12,5 GHz
InsertionLoss	2,9 dB
InsertionLossUniformity	0,4 dB
NoiseDynamic	1 dB
NoiseResolution	12,5 Gbits/s/4
NoiseThreshold	-100 dB

Tabla 8: Parámetros de configuración del AWG cíclico que demultiplexa las señales al canal 19 y 20

Filter	
FilterType	LowPass
TransferFunction	Bessel
Banswidth	0,75*12,5 Gbits/s
FilterOrder	4

Tabla 10: Parámetros de configuración de los filtros paso bajo utilizados en los canales 19 y 20

Photodiode	
Responsivity	1 A/W
PhotodiodeModel	APD
DarkCurrentMultiplied	0
DarkCurrentNonMultiplied	0
AvalancheMultiplication	10
IonizationCoefficient	1
ThermalNoise	10E-12
ShotNoise	Off

Tabla 13: Parámetros de configuración de los fotodiodos utilizados para el canal 19 y 20

BER_OOK_Stoch	
EstimationMethod	Gauss
SampleType	Optimum
ThresholdType	Optimum
DetectorType	APD
DarkCurrentMult	0
DarkCurrentNonMult	0
AvalancheMult	10
IonizationCoefficient	1
IncludeShotNoise	No
ThermalNoise	10E-13 A / $\sqrt{Hz}$
ElecNoiseBandwidth	1E9 Hz

Tabla 11: Parámetros de configuración utilizados del receptor con el que se calcula la BER

Parámetros generales de simulación	
TimeWindow	64 / BitRateDefault
GreatestPrimeFactorLimit	2
InbandNoiseBins	OFF
BoundaryConditions	Periodic
LogicalInformation	ON
SampleModeBandwidth	SampleRateDefault
SampleModeCenterFrequency	188,72E12
SampleRateDefault	16*12,5 Gbits/s
BitRateDefault	12,5 Gbits/s

Tabla 12: Parámetros de configuración utilizados en los parámetros generales de la simulación

## **Annex VI: Summary**

### **Introduction**

This document builds on the work entitled "Analysis of monitoring techniques in passive optical network (PON) and monitoring developments in radiofrequency in WDM-PON networks" done in the Group of Displays and Photonic Applications of Electronic Technology Department of the University Carlos III of Madrid. The work has been supervised by the Dr. Carmen Vazquez and assisted by members of the department. The different instruments used in the project and performed developments are within the frame of competitive project TEC2015-63826-C3-2-R (MINECO/FEDER).

The contents of the document are mainly, an analysis of the monitoring techniques of passive optical networks that currently exist, in both TDM-PON as WDM-PON networks. In addition, we explain manual detection techniques of failures in fibers and the OPM.

Subsequently, this work develops the manufacture of a controller board of an optical switch, whose design had already been done at the Group of Displays and Photonic Applications of the Universidad Carlos III. To do this, we analyze the electrical and optical operation of the optical switch, and carry out a development in Labview. This controller board will be used to complete the study case in the preventive optical monitoring system with colourless reflectors, developed by the Group of Displays and Applications of Electronic Technology Department of the University Carlos III of Madrid.

For this study case, we will do a simulation in VPI, where the system is implemented in a WDM-PON network, and we will do optical power and BER measurements to demonstrate that the use of the monitoring technique produces a negligible effect in the quality of the data transmission on the WDM-PON network. To do this, it is also designed a WDM-PON network without engaging the monitoring technique to compare their performance with the simulation previously performed.

### **Objectives**

Customers and suppliers are increasingly demanding more speed and quality of services. Trends such as Internet of things, the convergence of services and the constant improvement of the quality of services are causing the use of optical networks to replace copper cable networks due to its several advantages. The optical networks are used both in environments of long reach and short range. In the case of Passive Optical Networks (PON), they can be based on time multiplexing (TDM-PON) or wavelength multiplexing (WDM-PON). These networks are applied to architectures as FTTH among others. This architecture allows deploying the fiber to the client home delivering high-speed services.

Some of the challenges that come with the growth of these networks, the requirement for greater capacity and their complexity, are the detection and location of faults due to its technical difficulty and high costs to the suppliers. The biggest problem of the current faults detection systems in PON networks is the need to perform manual jobs by the suppliers to detect failures and the costs that this entails. Therefore, it is very important to automate the monitoring systems of these networks for the faults detection. Something that will focus this document.



The first step will be to introduce the most used types of passive optical networks and subsequently, we explain some techniques of failure detection. In addition, it is also cited some techniques of optical performance monitoring (OPM) that can be used as auxiliary elements to control certain parameters.

Due to the high demands of the WDM-PON networks, it is interesting to present cases of study such as the preventive optical monitoring system with colourless reflectors that is developed in this work. Their advantages and disadvantages are described below.

### **Catalog of monitoring techniques for the fault detections in PON networks**

The section 9 of this document compares the monitoring techniques in optical networks that are set out in the work. The summary of these comparisons is the following:

If we want to use a technique with high capacity, which locates the faults, that has active components in the RN, low notification time... means having high costs. In addition, the complexity of the method is usually related to the ability to scale it. If we do not have too budget and we want to use a technique for networks TDM-PON, it is advisable to use more economic techniques such as those based on bypass or OTDRs. However, if we have to design a network that has to support many users, is suitable to use monitoring techniques based on reflective elements. In this type of techniques, the reflective elements depend on each user. This implies an increase in the complexity of inventory. Performing the same reasoning with the monitoring techniques dedicated to networks WDM-PON, the most economical are OFDR techniques, the technique based on optical multiplexing by division of code and the technique based on self-reference by radio frequency. With regard to the capacity, techniques for WDM-PON networks developed in the document have high capacity and a similar value of capacity. If you need techniques that are flexible in sensitivity and linearity in the detection of faults, the most adequate are the technique of self-reference by radiofrequency and the preventive optical monitoring system with colourless reflectors.

### **Optical switch design**

To do the study case proposed in this work, has been used a 1x2 optical switch in the VPI simulation. This optical switch has been configured with the same parameters in the simulation, as the existing optical switch of the Group of Displays and Photonic Applications of the Universidad Carlos III.

The objective in this part of the work is to achieve the correct operation of the board that controls the optical switch. These functions are the ability to control the optical switch manually using a switch and automatically by a development in Labview. To control the optical switch is necessary to use the following scenario:

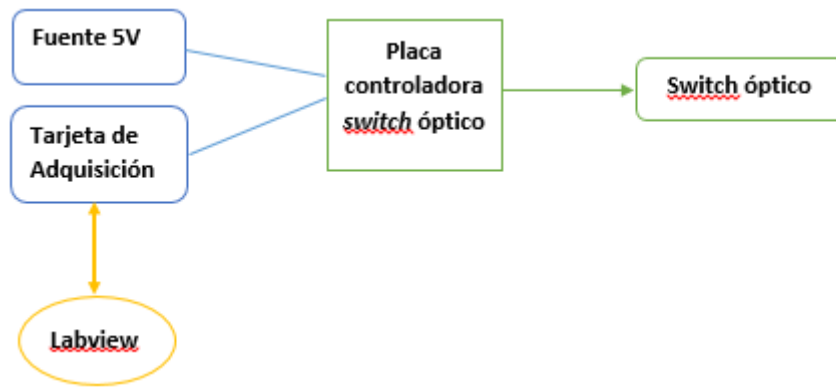


Figure 1: Schematic of the system to control the optical switch

To use the switch, it has been necessary to do a characterization, and an electrical and optical testing:

On the side of the electrical tests, we measure the continuity of the welds of the controller board to make sure they have been properly carried out, and the voltages and currents to check that the relay of the board is powered with a sufficient current. It is also checked if the optical switch meet with the control logic required in status ON and OFF. The status of the optical switch can be ON or OFF. The ON status provides 5 volts in the relay and the OFF mode, 0 volts.

The optical tests that are the following: first, we connect the switch on the base of the board and apply to the circuit a signal of 0 or 5 volts, using the acquisition card to check if the switch makes the change of output port. Secondly, we characterize the optical switch.

With the results obtained, we can conclude that with the automatic mode activated and the switch ON/OFF of Labview in ON status, the light is routed by the port 3 and when is in OFF status is routed by the port 2. In addition, in manual mode, when the switch of the plate board is set to OFF, the light is routed by the port 3 and if it is in ON mode, for port 2. With these checks it has been demonstrated that the optical switch changes from path correctly.

The second part is to characterize the optical switch. To do this, we estimate the insertion losses, return losses, crosstalk and the response time. These measures shall be taken for different wavelengths that are used in the monitoring technique that we will discuss later in this work. The wavelengths are 1472 nm, 1547.71. nm and 1577 nm. The last two wavelengths are used in the uplink of the WDM-PON network, although in this work is only focused on the downlink. The measures are very similar in both cases. To calculate the return loss we will use a circulator. After characterizing the circulator to take into account their insertion losses for the calculation of the return loss, we get the results:

$\lambda=1472$ nm					
ESTADO DEL SWITCH	Pin1 = 6 dBm --> 3.98 mW				
OFF	Pout3	-71.2 dBm		Lins2	1.733 dB
OFF	Pout2	4.27 dBm --> 2.67 mW		Lins3	1.669 dB
OFF	Pout1	-54 dBm		Cross2	76 dB
ON	Pout3	4.33 dBm --> 2.71 mW		Cross3	77,2 dB
ON	Pout2	-70 dBm		Lret1ON'	49.3 dB
ON	Pout1	-45.8 dBm		Lret1OFF'	60 dB
				Lret1ON	43.52 dB
				Lret1OFF	54.22 dB

Table 1: Values of the characterization of the optical switch measured with a wavelength of 1472 nm

$\lambda=1547,71$ nm					
ESTADO DEL SWITCH	Pin1 = 6 dBm --> 3.98 mW				
OFF	Pout3	-72 dBm		Lins2	1.733 dB
OFF	Pout2	4.28 dBm --> 2.67 mW		Lins3	1.589 dB
OFF	Pout1	-54 dBm		Cross2	valor alto
ON	Pout3	4.29 dBm --> 2.76 mW		Cross3	78 dB
ON	Pout2	$\approx 0$ mW		Lret1ON'	49.18 dB
ON	Pout1	-43.2 dBm		Lret1OFF'	60 dB
				Lret1ON	44.1 dB
				Lret1OFF	54.92 dB

Table 2: Values of the characterization of the optical switch measured with wavelength 1547,1 nm

$\lambda=1577$ nm					
ESTADO DEL SWITCH	Pin1 = 6 dBm --> 3.98 mW				
OFF	Pout3	-66.1 dBm		Lins2	1.6 dB
OFF	Pout2	4.4 dBm --> 2.75 mW		Lins3	1.542 dB
OFF	Pout1	-54 dBm		Cross2	94 dB
ON	Pout3	4.46 dBm --> 2.79 mW		Cross3	72.1 dB
ON	Pout2	$\approx -88$ dBm		Lret1ON'	49.6 dB
ON	Pout1	-43.6 dBm		Lret1OFF'	60 dB
				Lret1ON	45.24 dB
				Lret1OFF	55.64 dB

Table 3: Values of the characterization of the optical switch measured with a wavelength of 1577 nm

The last step in the optical testing of the switch is to measure the time it takes to change the port. The method is to calculate the time difference between the moment in which the output of the DAQ varies the signal value to 0 or 5 volts or vice versa, and the moment in which the entire optical power is transmitted to the port which the switch has switched. To do this, we use the following scheme:

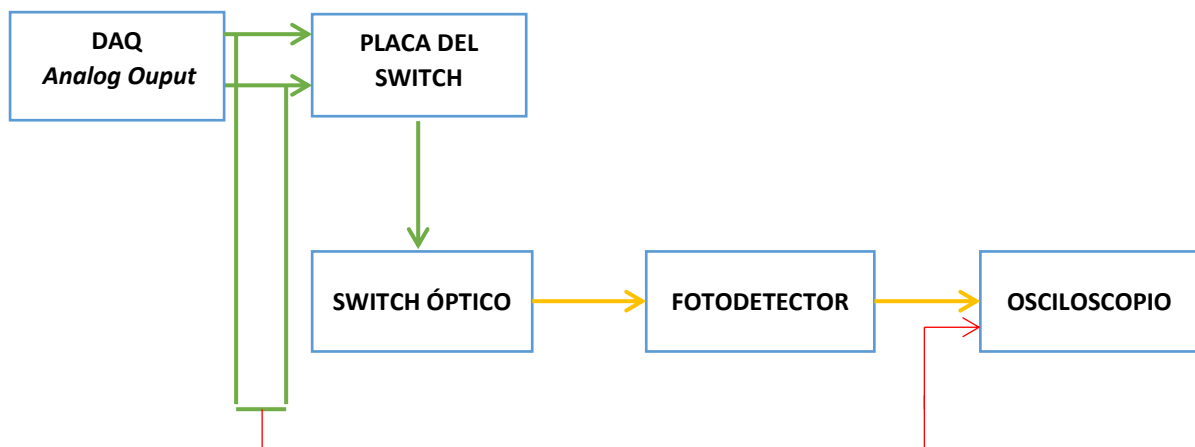


Figure 2: Schematic of the system to measure the response time of the optical switch  
Green: Electrical Link Red: BNC Link Yellow: Optical Link

It is necessary to use the trigger of the oscilloscope in order to observe the DAQ *AnalogOut* signal and optical switch output signal at the same time, when the optical switch switches. To measure the time difference between a signal and the other, we will catch the 50% of the slope of the time of lowering or raising in each signal. To analyze the results of the five measures taken, we will be collected the maximum and minimum value of the response times, and will be calculate the mean and standard deviation of these values. We can see the results in the following table:

Valores medidos	Valor máximo	Valor mínimo	Media	Varianza	Desviación típica
11,1 ms	11,52 ms	11,1 ms	11,339 ms	0,1029 ms <sup>2</sup>	0,3207 ms
11,44 ms					
11,52 ms					
11,35 ms					
11,287 ms					

Table 4: Results of the measures of the response time of the optical switch

Seeing the results, we can conclude that the precision of the measurements is quite high because the value between the minimum and the maximum is 0.41 ms, which is not too high. The standard deviation is quite low with a value of 0.3207 ms. The response time of the switch has an average value of 11.339 ms, which is acceptable in view of the age of this device and its possible deterioration.

### Study Case

This study case consists in the simulation in VPI of the preventive optical monitoring system with colourless reflectors, evolved from the self-reference by radio frequency technique on a WDM-PON network using the computers in the Group of Displays and Photonic Applications of the Department of Electronics Technology. This technique is explained in detail in section 7.10.

In the case of this project, we work with the optical switch characterized, separating two ODNs of the evolved technique. Therefore, in the simulation we place the optical switch just before the power fiber. In this way, the switch has the ability to separate two different optical networks to which the OLTs give services. There are two different networks for power and BER measurements:

#### *Classical WDM-PON network*

The first is a classic WDM-PON network that does not include the elements to monitor the passive network, as shown in figure 3. To perform the simulation we take into account the parameters that appear in [18]. We use the following parameters: a bit rate of 12.5 Gbit/s, a PBRs of order 30 (maximum value in VPI) in the bit generator, a supply fiber of 15 km and a distribution fiber of 1 km. Both have an attenuation of 2 dB/km. We use two laser sources (Laser Pulsed in VPI) to simulate two OLTs that transmit data with wavelengths 1589.65 nm and 1588.84 nm with a spectral width of 0.21 nm. These wavelengths correspond to the port 19 and 20 of AWG respectively. These wavelengths meet with the requirements of standard G.698.3 [23] of the ITU (Annex IV) in downlink.



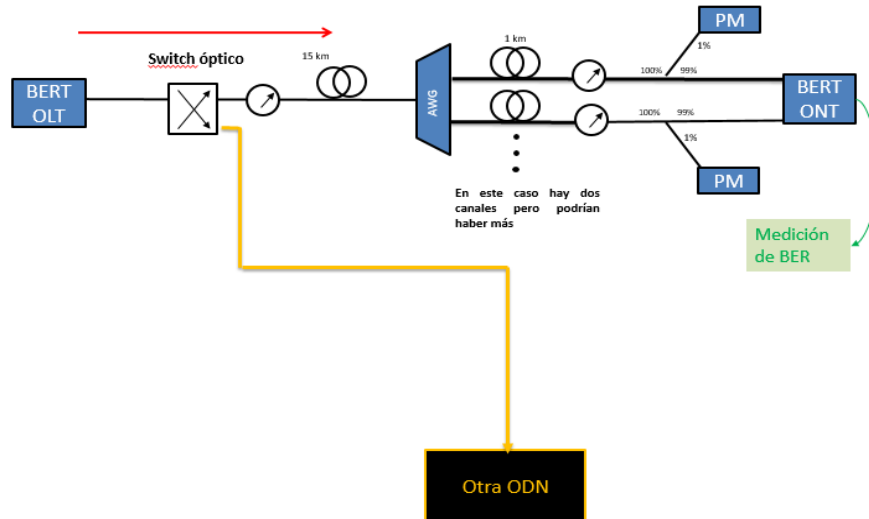


Figure 3: Architecture of the classic network WDM-PON

In reception of the signals, in each ONU is used an attenuator VOA that simulates the fault in the branch when the value of the attenuator exceeds a certain value. In addition, we use photodiodes to convert the optical signals to electrical, a low pass filter, a signal collector that replicates the input signal by compensating for the delay that has suffered such a signal during the spread by the optical network, and subsequently, the driver receiver, so you can get the eye diagrams and calculate the BER.

#### *WDM network-PON with monitoring system*

In the second network, we add necessary elements to apply the monitoring technique in the classic network, as can be seen in figure 4. In this network are used two monitoring lasers (Laser CW on VPI) with wavelengths 1469.68 nm ( $\lambda_{m1}$ ) and 1470.33 nm ( $\lambda_{m2}$ ) whose separation in frequency is 90 GHz. These parameters meet with the requirements of standard G.698.3 [23] of the ITU (Annex IV) in the downlink of the network. This separation in frequency is identical to the data sources separation, for the correct configuration of AWG in the simulation. We also use a laser source that serves as a reference ( $\lambda_0$  in paragraph 7.10) with a wavelength of 1490 nm. These sources have a spectral width of 0.09 nm and they are in the spectrum of the S-band

To separate monitoring and data signals, we add an optical switch to separate the three laser sources dedicated to monitoring. In the simulation, this switch is configured with the same parameters as the switch that has been studied and characterized in this document. To carry the signals by the supply fiber is used a cyclical AWG. We use a fiber length of 15 km that transmits the multiplexed signal. Before the spool of fiber, we place a VOA attenuator to be able to simulate an error occurred in the supply fiber by increasing the value of this attenuator. Subsequently, we place a FBG (Bo) that reflects the reference signal  $\lambda_0$  (1490 nm) with a spectral width of 0.5 nm and the AWG that demuxes the signal for the two ONUs. In the first channel is received a data signal of 1589.65 nm and the monitoring signal of 1470.33 nm, while in the second channel is received a data signal of 1588.84 nm and the monitoring signal of 1469.68 nm. After every distribution fiber, it is placed an identical FBG (B) in each ONU to reflect the monitoring signal. These two



FBGs are identical and centralized in 1470 nm and have the sufficient spectral width to cover the two monitoring wavelengths. Therefore, are configured with a spectral width of 5 nm.

Finally, multiplexed and reflected signals of 1470.33 nm and 1469.68 nm enter in the circulator to be demultiplexed again. This simulates the uplink direction in the reflected signals. For this, we use cyclical AWGs. To finish, the signal that is reflected from 1490 nm is also entered in the circulator, thus obtaining the three reflected signals to the output of the circulator. These three signals are sent to the OMM, although as explained above, this work will not focus on the operation of this device.

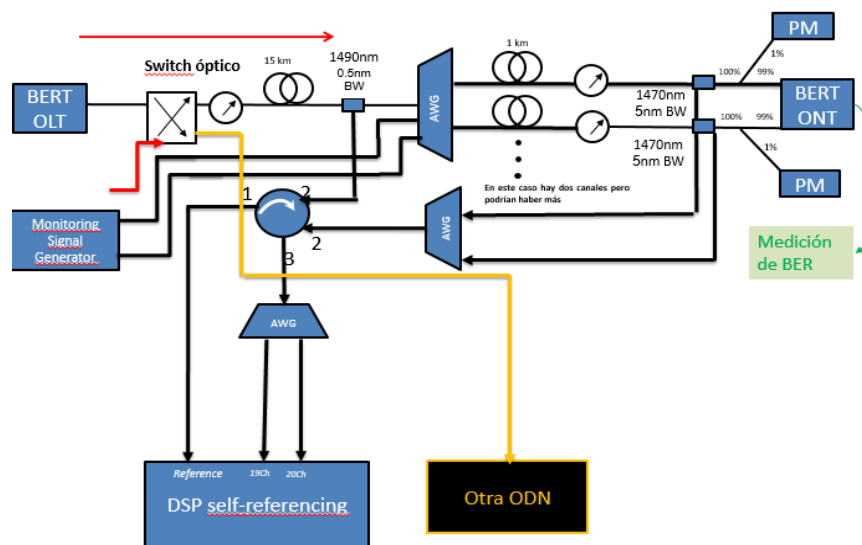


Figure 4: Architecture of the classic network WDM-PON with the monitoring system

## Measures of the power balance

Figures 5 and 6 show the insertion loss depending on the value of the attenuation in the VOA, for channels 19 and 20, respectively.

The measures and graphs above may conclude that the system of self-reference does not introduce big losses. In the measures of channel 19, losses due to the use of the monitoring system are 0.39 dB and 0.4 dB in channel 20. Both values are the corresponding with a value of 0 dB of attenuation in the VOA. These additional losses are due to the insertion of the FBGs in the downlink. In figures 5 and 6 is observed as the variation of insertion losses keep constant. This means that the losses are independent of the value of the VOAs attenuation. We can also emphasize that the losses between the two channels in first network is 0.29 dB and 0.3 dB in second network. As is logical, these two values are very similar and its minimal difference is due to the possible inaccuracy when we are taking the decimals in the measures.

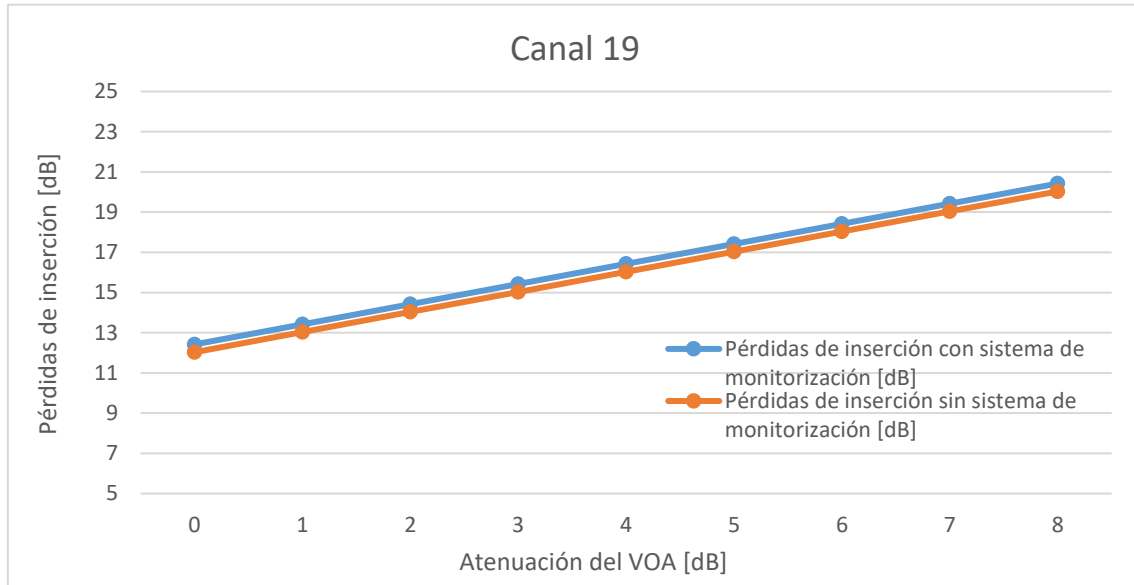


Figure 5: Insertion losses in channel 19 for the two scenarios with different attenuations of VOA

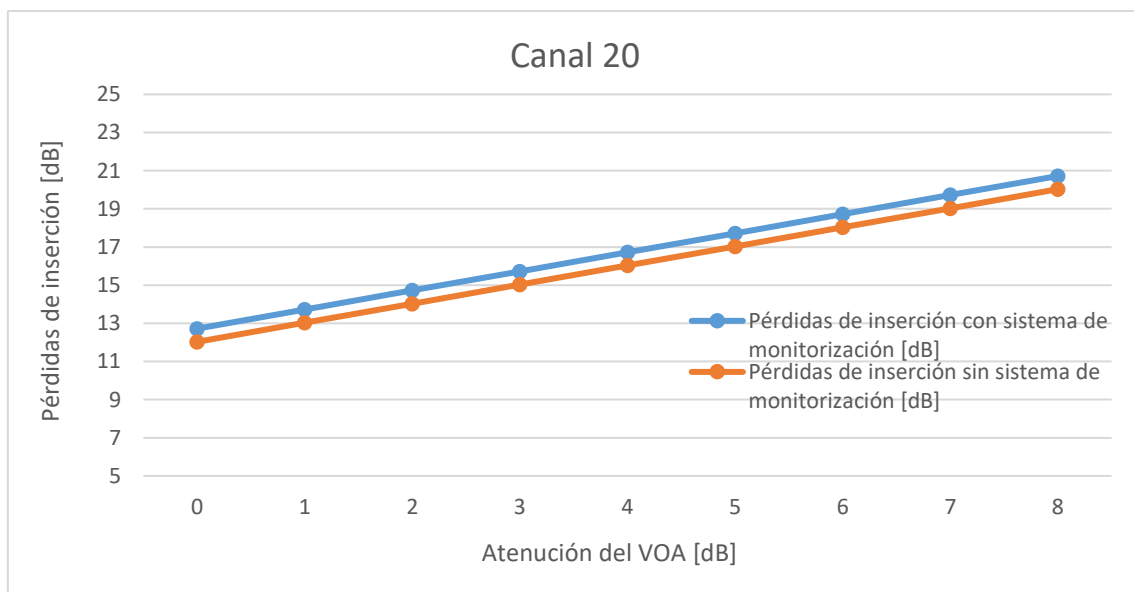


Figure 6: Insertion losses in the channel 20 for the two scenarios with different attenuations of VOA

### Measures of the BER

Figures 7 and 8 show the values of the BER on channels 19 and 20, in the WDM-PON network without the monitoring system and with the monitoring system, respectively. In figures 7 and 8, the range of values of the BER is approximately between  $10E-9$  and  $10E-2$ . The minimum value accepted for the data transmission is  $10E-3$  and the minimum value that appears of the BER is approximately  $10E-9$ . This value corresponds to the value of quality of the BER that we want to achieve. With this value, we set the sensitivity of the receiver.

The graph without the monitoring system shows that when the VOA is equal to 0 dB, BER has a lower value than the graph of WDM-PON network with the monitoring system. This network inserts greater losses. In addition, the decreasing trend of the BER in the

graph in figure 8, is faster than in the figure 7, since the network WDM-PON with the monitoring system becomes more sensitive to the BER due to higher insertion losses.

Finally, it is necessary to explain the different trends that have the curves of the BER in canals 19 and 20, in the WDM-PON network with monitoring system (figure 8). This is caused by the fact that in the network with the monitoring system, the insertion losses are higher and the system becomes more sensitive to the chromatic dispersion. It is logical that the channel 20 have a higher speed on the decline of the BER, since this channel works with a higher wavelength.

All the results and conclusions obtained are conditioned with the chosen parameters like powers, bandwidths, fiber lengths, etc. The device parameters in the simulation are detailed further, in Annex V.

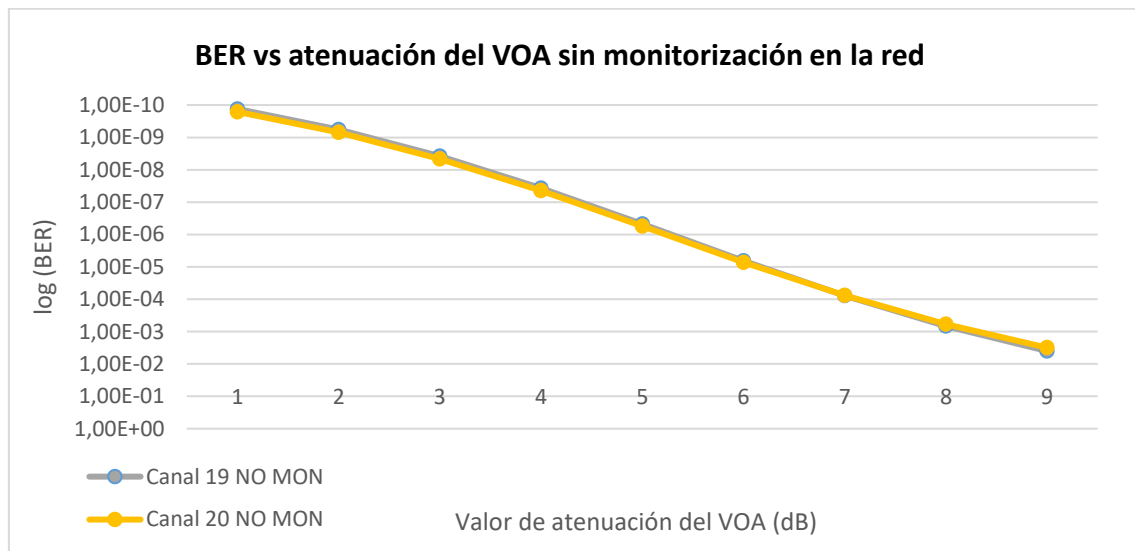


Figure 7: Values of the BER measured on channels 19 and 20 in function of the attenuation of the VOAs in the WDM-PON network without the monitoring system

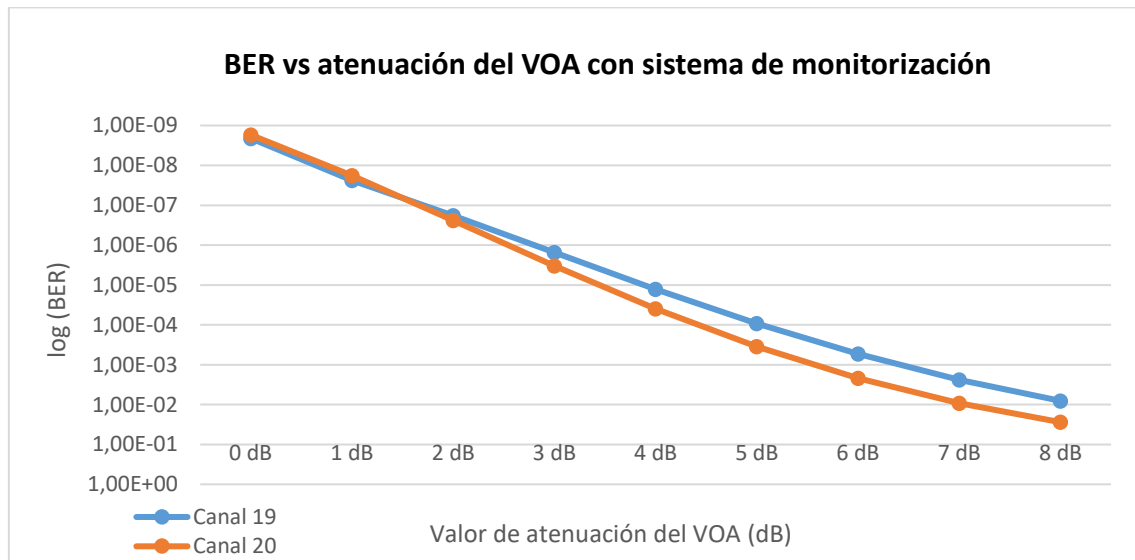


Figure 8: Values of the BER measured on channels 19 and 20 depending on the attenuation of the VOAs in the network WDM-PON network with the monitoring system



## Conclusions

As it has been explained in the theoretical part of this document, the number of users in PON is in constant increase, as well as its complexity, capacity, scalability... These multiple monitoring techniques of failure detection are adapted to the needs that each network requires, as has been indicated in the comparison tables of the chapter 9.

The current trend is to use hybrid TDM-WDM networks that accumulate the advantages of the TDM-PON and WDM-PON networks. These kind of networks combine the advantages of the monitoring techniques of both architectures explained in this document, according to their needs. In the absence of developing more advanced techniques for these networks, the most suitable techniques are those compatible with TDM-PON and WDM-PON as the technique based on tunable OTDR.

Monitoring costs are rising because of the needs of designing networks with the capacity to serve more users and with higher speeds. In addition, operators are interested in applying techniques with the smallest number of possible elements to minimize failures and costs. The use of an OTDR in each branch would not meet this requirement, as well as the excessive use of passive components. Furthermore, networks that serve a large number of users require an excessive real time to monitor the entire network.

With regard to the commercial products explained in this document, we can see that the business objectives are to offer complete analysis to detect and locate faults. In addition, some products allow having additional features such as the collection of data and statistics of faults. Furthermore, there is a tendency to design systems that can be used by several operators at the same time. It allows the network to be more efficient as the majority of the operators share resources on the network.

To conclude, this work develops a simulation of the optical monitoring system with colourless reflectors. It is developed with the application Virtual Photonics Instrumentation (VPI). With this simulation, we show that you could get a good BER without raising the power of the emitting lasers, in a WDM-PON network with this monitoring system. In addition, it has been demonstrated that when we enter the monitoring system in a WDM-PON network, the inserted losses are small. To do this, it has been made a power balance and an analysis of the BER. Both processes have been based on the values of the VOAs attenuations included in the network.